



Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICIOS DE
CONCRETO REFORZADO CON DISIPADORES
HISTERÉTICOS. PROPUESTA DE DISEÑO
RESILIENTE CONFORME A REGLAMENTO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL
P R E S E N T A

**HORACIO DE JESÚS
NANGULLASMÚ HERNÁNDEZ**

DIRECTOR DE TESIS: **DR. ARTURO TENA COLUNGA**

CIUDAD DE MÉXICO

NOVIEMBRE DE 2019

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos generales.....	4
1.2 Objetivos específicos	4
ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE DE INVESTIGACIONES DE DISIPADORES DE ENERGÍA POR HISTÉRESIS DEL MATERIAL.....	7
2.1 Introducción	7
2.2 Estudios enfocados a reparación de estructuras.....	10
2.3 Estudios orientados al diseño inicial de estructuras.....	15
2.4 Metodologías de diseño con balances de rigidez	19
EVALUACIÓN DE MODELOS DE 1GDL CON DISIPADORES DE ENERGÍA	31
3.1 Introducción	31
3.2 Impacto del confinamiento en elementos de concreto reforzado.....	32
3.3 Resultados de análisis estáticos no lineales para modelos de 1GDL.....	34
EVALUACIÓN DE DETALLADO DÚCTIL MÍNIMO PARA MARCOS CON DISIPADORES HISTERÉTICOS DE ENERGÍA	45
4.1 Introducción	45
4.2 Diferencias en el diseño del refuerzo por confinamiento transversal	48
4.3 Resultados de análisis estáticos no lineales para marcos de concreto con disipadores de energía.....	57
4.4 Balances de rigidez óptimos	66
4.5 Propiedades dinámicas de marcos con disipadores de energía.....	68
4.6 Parámetros sísmicos propuestos	71
COMPARATIVA DE ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA EN EL PLANO Y EN TRES DIMENSIONES	75
5.1 Introducción	75
5.2 Configuración geométrica de modelos evaluados	76
5.3 Configuración de modelado de los disipadores	77
5.4 Discretización de datos para los análisis no lineales	81
5.5 Resultados de análisis estáticos no lineales	83
5.5.1 Marcos planos de cinco niveles	83
5.5.2 Marcos planos de 20 niveles.....	85
5.5.3 Marcos acoplados y modelos tridimensionales de cinco niveles	87
5.6 Resultados de análisis dinámicos no lineales paso a paso	90
5.6.1 Filtrado de señales	90

5.6.2	Modelo Berkeley	91
5.6.3	Modelo BRB de Vargas y Bruneau	94
5.6.4	Marco plano de 20 niveles.....	97
5.6.5	Marcos acoplados y modelos tridimensionales de cinco niveles	99
5.7	Comentarios finales	102
DISEÑO DE EDIFICIOS TRIDIMENSIONALES CON BASE EN PARÁMETROS SÍSMICOS PROPUESTOS.....		105
6.1	Descripción de la metodología de diseño propuesta.....	105
6.2	Descripción de los edificios estudiados	109
6.3	Modelado de disipadores de energía.....	111
6.3.1	ADAS (Added Damping And Stiffness)	111
6.3.2	TADAS (Triangular Added Damping And Stiffness).....	112
6.3.3	Panel de Cortante.....	112
6.3.4	Contravientos restringidos contra pandeo (BRB).....	113
6.4	Consideraciones generales de análisis lineales	114
6.4.1	Combinaciones de carga.....	115
6.4.2	Modelado de interacción suelo-estructura (ISE)	116
6.5	Diseño de columnas para edificios esbeltos	123
6.6	Resumen de los diseños finales de los edificios	128
6.6.1	Propiedades dinámicas finales de los edificios en base rígida	128
6.6.2	Propiedades dinámicas finales de los edificios considerando ISE	132
6.6.3	Diseño final para los disipadores de energía en dirección <i>X</i>	136
6.6.4	Diseño final para los disipadores de energía en dirección <i>Y</i>	138
6.6.5	Diseño final de contravientos	139
6.6.6	Secciones finales para vigas y columnas de los modelos tridimensionales .	142
6.6.7	Impacto en el diseño de columnas de los edificios esbeltos.....	147
6.7	Revisión de los balances de rigidez α y β de diseño.....	148
6.8	Cumplimiento de las Distorsiones de Entrepiso Permisibles	150
6.8.1	Estado Límite de servicio	150
6.8.2	Estado límite de prevención de daño a elementos del marco	152
6.9	Comentarios finales de los diseños	153
6.10	Propuesta actualizada de periodos de vibrar	154

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS MODELOS TRIDIMENSIONALES CON BASE EN ANÁLISIS ESTÁTICOS NO LINEALES.....	157
7.1 Introducción	157
7.2 Consideraciones generales	157
7.3 Resultados de análisis estáticos no lineales	159
7.3.1 Curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea.....	159
7.3.2 Cortantes de entrepiso normalizadas con el peso total de la estructura.....	166
7.3.3 Mapeos de fluencia inelástica.....	168
7.4 Comentarios generales	182
EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS MODELOS TRIDIMENSIONALES CON BASE EN ANÁLISIS DINÁMICOS NO LINEALES PASO A PASO	185
8.1 Introducción	185
8.2 Consideraciones generales	185
8.3 Parámetros dinámicos evaluados	189
8.4 Modelos de ocho entrepisos.....	193
8.4.1 Base rígida	193
8.4.2 Base flexible	200
8.4.3 Respuestas globales	212
8.5 Modelos de 15 entrepisos	218
8.5.1 Base rígida	218
8.5.2 Base flexible	236
8.5.3 Respuestas globales	256
8.6 Modelos de 24 entrepisos	262
8.6.1 Base rígida	262
8.6.2 Base flexible	288
8.6.3 Respuestas globales	317
8.7 Comentarios generales.....	323
RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	331
REFERENCIAS	337
Apéndice A. Diseño de vigas secundarias.....	347
Apéndice B. Diseño de losa maciza de concreto.....	353
Apéndice C. Diseño de muros de concreto reforzado (sótanos).....	355

Apéndice D. Modelos de histéresis empleados en elementos de concreto reforzado y en contravientos metálicos	361
Apéndice E. Registros de aceleración y espectros de respuesta.....	369
Apéndice F. Resultados para edificio de ocho entrepisos con análisis dinámicos paso a paso no lineales	381
F.1 Base Rígida	381
F.1.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS	381
F.1.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB	390
F.1.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x	406
F.1.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y	414
F.1.5 Mapeos de fluencia en dirección x	422
F.1.6 Mapeos de fluencia en dirección y	427
F.1.7 Respuesta Global	433
F.1.8 Distorsiones Residuales.....	439
F.2 Base Flexible	443
F.2.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS	443
F.2.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB	451
F.2.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x	467
F.2.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y	483
F.2.5 Mapeos de fluencia en dirección x	499
F.2.6 Mapeos de fluencia en dirección y	505
F.2.7 Respuesta Global	511
F.2.8 Distorsiones Residuales.....	517
Apéndice G. Resultados para edificio de 15 entrepisos con análisis dinámicos paso a paso no lineales	521
G.1 Base Rígida.....	521
G.1.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS.....	521
G.1.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB.....	538
G.1.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x	570
G.1.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y	586
G.1.5 Mapeos de fluencia en dirección x	602
G.1.6 Mapeos de fluencia en dirección y	610
G.1.7 Respuesta Global	619

G.1.8 Distorsiones Residuales	625
G.2 Base Flexible	629
G.2.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS.....	629
G.2.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB.....	645
G.2.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x	677
G.2.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y	693
G.2.5 Mapeos de fluencia en dirección x	710
G.2.6 Mapeos de fluencia en dirección y	718
G.2.7 Respuesta Global	726
G.2.8 Distorsiones Residuales	732
Apéndice H. Resultados para edificio de 24 entrepisos con análisis dinámicos paso a paso no lineales	736
H.1 Base Rígida.....	736
H.1.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS.....	736
H.1.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB.....	768
H.1.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x	816
H.1.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y	848
H.1.5 Mapeos de fluencia en dirección x	880
H.1.6 Mapeos de fluencia en dirección y	896
H.1.7 Respuesta Global	912
H.1.8 Distorsiones Residuales	918
H.2 Base Flexible	922
H.2.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS.....	922
H.2.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB.....	954
H.2.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x	1002
H.2.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y	1034
H.2.5 Mapeos de fluencia en dirección x	1066
H.2.6 Mapeos de fluencia en dirección y	1082
H.2.7 Respuesta Global	1098
H.2.8 Distorsiones Residuales	1104

1. INTRODUCCIÓN

Gran parte del territorio mexicano se encuentra vulnerable ante distintos tipos de desastres naturales. Los movimientos sísmicos intensos son probablemente los que más daño han producido a la sociedad mexicana tanto en pérdidas de vidas, así como de sus bienes patrimoniales y/o públicos. Por tal motivo, los reglamentos de construcción en México se enfocan en preservar la vida de sus habitantes con base en la disipación de la energía sísmica por medio del daño controlado de sus componentes estructurales principales (asociado a pérdidas de rigidez y resistencia de los elementos primarios). Dependiendo de la importancia que se le atribuya a la estructura, se le permite cierta cantidad de daño estructural. Para la mayoría de los casos, esta filosofía de diseño tiene como consecuencia la suspensión de actividades mientras duran los trabajos de reparación necesarios en una estructura dada, para los casos en que esto sea viable.

Con el incremento exponencial de la población y de sus necesidades, las ciudades crecen a ritmos cada vez más rápidos y se necesita de infraestructura, que además de garantizar la vida de sus ocupantes, puedan continuar completamente en operación después de un evento post-sísmico. Una alternativa que resultó atractiva para los ingenieros connacionales, después del sismo suscitado en septiembre de 1985, fue el control de la respuesta sísmica debido a que, además de asegurar la vida de las personas, pretende garantizar la operatividad de cualquier estructura después de que ocurra un sismo de magnitud considerable.

Existen diversas investigaciones acerca de las aplicaciones de los sistemas de control de la respuesta sísmica, los cuáles reportan el uso de estos sistemas desde hace más de un siglo cuando John Milne, un profesor de ingeniería en Japón, construyó una pequeña casa de madera sobre balines para demostrar que una estructura podía ser aislada sísmicamente (Housner *et al.* 1997). El control de la respuesta sísmica puede tener diversas clasificaciones en función de la forma de modificar y mejorar las propiedades dinámicas de la estructura; el presente trabajo se enfoca en el estudio de los disipadores histeréticos de energía por medio de la fluencia del material.

Este tipo de disipadores se encargan de distribuir las demandas de ductilidad a través de la estructura, consecuencia de los movimientos del terreno, y no dependen de una fuente de poder externa para llevar a cabo este objetivo. Comúnmente, los disipadores de energía se instalan en elementos de contraventeo focalizando la no linealidad del sistema completo en dichos dispositivos. Su eficacia depende de diversos factores dentro de los cuales se encuentran la cantidad de dispositivos utilizados, la ubicación dentro del sistema estructural, el tipo de disipador empleado y principalmente su adecuado diseño. Los disipadores por histéresis del material, fueron de los primeros en estudiarse, basándose en el principio de emplear materiales capaces de mantenerse estables ante un número importante de incursiones cíclicas inelásticas, antes de fallar por fatiga o fracturarse. La elección inicial para cumplir con esta premisa fue el de utilizar elementos metálicos, especialmente aleaciones de acero, debido a su disponibilidad y costo (Tena 2011).

El primer uso en México de este tipo de disipadores se empleó para un proyecto de reparación en la calle de Izazaga 38-40 de la Ciudad de México en 1989 (figura 1.1). El edificio experimentó daño estructural moderado durante los sismos de 1985, a causa de la alta flexibilidad de los marcos de concreto con losas planas reticulares. Lo interesante de este proyecto es que se llevó a cabo sin que el reglamento vigente de la época tuviera parámetros de diseño para el uso de disipadores de energía, lo que exponía al diseñador a un alto riesgo profesional debido a que no estaría protegido por el manto judicial que proporciona el uso de las especificaciones del código de construcción (Martínez-Romero 1993).



Figura 1.1. Edificio Izazaga 38- 40

Históricamente, antes de la publicación de las NTCS-95, ningún reglamento en el país admitía o prohibía el uso de este tipo de dispositivos para el control de la respuesta sísmica. A partir de 1995, se admitía el uso de dispositivos disipadores de energía siempre y cuando se demostrara ante la autoridad competente la eficacia de la solución estructural (Tena 2003). En 2014 se proponen lineamientos para la reducción del espectro de diseño a partir de un incremento en su amortiguamiento de tipo viscoso para diferentes tipos de suelo de la Ciudad de México; dicha propuesta está en función del periodo dominante del suelo, su amortiguamiento crítico y el periodo fundamental de la estructura (Castillo y Ruiz 2014). Dicha propuesta es congruente con el Apéndice A de las NTCS-04, donde se plantea la reducción del espectro de diseño por un factor reductivo por amortiguamiento suplementario debido a la interacción suelo – estructura (β).

Es hasta las Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo del 2017 (NTCS-17) donde se plantean parámetros de diseño sísmico, asociados a la ductilidad de la estructura y a los límites de distorsión de entrepiso permisibles a la prevención del colapso, para estructuras con contraventeo restringido al pandeo. Sin embargo, dicha normativa vigente no expone de manera detallada una metodología para el diseño del sistema estructura-disipador.

Con el propósito de fomentar el diseño y construcción de edificios con dispositivos de control pasivo de la respuesta sísmica, que no sean exclusivos de los contravientos restringidos contra pandeo, se presenta un amplio estudio paramétrico de marcos de concreto reforzado con disipadores por histéresis de energía montados en contraviento metálico, adaptando procedimientos de diseño comúnmente utilizados para diseñar sistemas estructurales convencionales. Por este motivo se plantea la validación de un método integral de diseño basado en balances de rigidez entre los diversos sistemas estructurales involucrados a partir de análisis no lineales estáticos y dinámicos paso a paso.

Se plantea en primera instancia la evaluación de marcos planos de concreto con ductilidad limitada y disipadores por histéresis de energía, proponiendo la adición de confinamiento dúctil a los elementos de vigas y columnas. El principal objetivo de esto es mejorar el desempeño estructural global evaluado a partir de sus mapeos de fluencia principalmente. Se parte de una metodología de diseño acorde a balances de rigidez entre el sistema de marco a momento y el sistema contraviento – disipador (α), y el sistema del disipador y contraviento (β). Además, se aprovechan resultados de estudios previos (Nangullasmú 2011, Tena y Nangullasmú 2013 y Tena-Colunga y Nangullasmú Hernández 2015) y algunas consideraciones de la práctica profesional, para proponer diferentes parámetros geométricos estructurales, como alturas de los modelos y ángulos de inclinación para los contravientos (θ).

Con base en los resultados de los análisis estáticos no lineales, se proponen magnitudes de distorsiones permisibles asociadas al daño de elementos no estructurales y a la limitación del daño del sistema del marco cuando el disipador desarrolle su ductilidad máxima esperada. Asimismo, se plantean factores de reducción asociados a la sobrerresistencia (R) y a la ductilidad global de la estructura (Q). Finalmente, se proponen ajustes y recomendaciones para el diseño particular de los diversos elementos involucrados con el sistema estructural estudiado.

Como segunda etapa del estudio y con base en los parámetros sísmicos de diseño comentados en el párrafo anterior, se diseñaron edificios tridimensionales teóricamente ubicados en tres diferentes zonas de la Ciudad de México. Posteriormente, se evaluó el comportamiento de los diversos modelos analíticos mediante una serie de análisis no lineales. Para esto se emplearon dos diferentes patrones de carga que tomaran en cuenta el 90% de la participación modal para los análisis estáticos no lineales. Para los análisis dinámicos no lineales paso a paso, se emplearon un conjunto de ocho pares de registros de aceleración representativos de la zona donde hipotéticamente estarán desplantados los edificios en estudio. Estos registros de aceleración se obtuvieron de eventos sísmicos de gran magnitud registrados y se complementaron con registros de aceleración generados de manera artificial.

A partir de los resultados presentados en la segunda etapa del estudio, se proponen y validan parámetros para el diseño sísmico de estructuras con disipadores de energía. Para este propósito se evalúan curvas de histéresis globales, de entrepiso y de los disipadores utilizados. Además, se comparan diversas gráficas asociadas a las distorsiones de entrepiso desarrolladas para los diferentes niveles de diseño, el número de ciclos asociados a la actividad inelástica de los disipadores, las demandas máximas de ductilidad de entrepiso, la relación de rigidez elástica y la secante asociada a los ciclos histéreticos de cada entrepiso, así como los diversos mapeos de fluencia inelástica para cada uno de los registros inducidos a los modelos analíticos.

1.1 Objetivos generales

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal el desarrollo y evaluación de una metodología integral de diseño sísmico de edificios con disipadores de energía que garantice un comportamiento estructural eficiente donde los disipadores sean los únicos que desarrollen comportamiento no lineal, permitiendo como reserva y segunda línea de defensa inelástica a las vigas, con una fluencia incipiente, en caso necesario. A partir de la propuesta de criterios de diseño sísmico que se puedan incluirse fácil y transparentemente a la normatividad vigente, se pretende incentivar a los ingenieros de la práctica profesional el diseño y construcción de estructuras con control de la respuesta sísmica.

1.2 Objetivos específicos

Los objetivos particulares fueron:

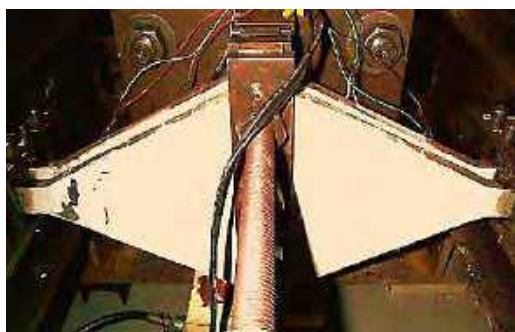
- a) Definir intervalos de rigidez “óptimos” entre los diferentes sistemas estructurales, en función de la relación de esbeltez de los modelos evaluados (H/L), con el propósito de que la ductilidad desarrollada por los disipadores no transfiera participación no lineal significativa a vigas y columnas.
- b) Evaluar si detallar el refuerzo transversal de los elementos de concreto reforzado con las especificaciones de elementos dúctiles, es suficiente para mitigar la participación no lineal, principalmente de columnas.
- c) Definir las ductilidades máximas recomendadas para el diseño de los disipadores de energía con base en la información generada.
- d) Determinación y evaluación de factores de comportamiento sísmico para diseño asociados a la ductilidad (Q) y la sobrerresistencia (R) que puede desarrollar el sistema global.

- e) Determinación de distorsiones de entrepiso ligado a condiciones de servicio para la mitigación de daños a elementos no estructurales (Δ_y) y para la limitación de daños a vigas y columnas cuando los disipadores alcanzan su ductilidad máxima (Δ_u).
- f) Mediante el estudio detallado de los modelos evaluados con los diferentes parámetros en cuestión, proponer una metodología de diseño sísmico resiliente que garantice la eficiencia estructural del sistema completo donde los disipadores de energía sean los únicos elementos que desarrollen participación no lineal.
- g) Evaluación de la metodología de diseño propuesta a partir de los resultados obtenidos de análisis no lineales (*pushover* y dinámicos paso a paso).

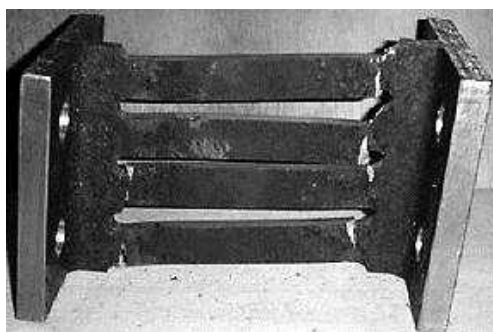
2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE DE INVESTIGACIONES DE DISIPADORES DE ENERGÍA POR HISTÉRESIS DEL MATERIAL

2.1 Introducción

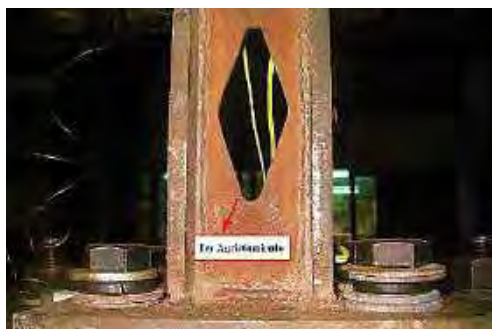
Durante los últimos 15 años, numerosos ingenieros han profundizado sus esfuerzos en diversos proyectos de investigación relacionados con dispositivos disipadores histeréticos de energía, algunos relacionados a nuevas configuraciones geométricas de dichos dispositivos. En éstos se demuestran la eficiencia de los nuevos disipadores a partir de pruebas experimentales (Shih y Sung 2005, Vera *et al.* 2006, Chan y Albermani 2008, Ghabraie *et al.* 2010, Lu *et al.* 2018). La mayoría de estas investigaciones tiene su motivación en optimizar la forma de los dispositivos a partir de geometrías simples y por ende reducir el costo de los mismos (figura 2.1). Los nuevos dispositivos muestran gran capacidad de deformación de manera estable para muchos ciclos de carga; sin embargo, pocas de estas investigaciones demuestran el estado de daño de los diversos elementos involucrados en el sistema estructural global antes de que falle el disipador de energía (Lu *et al.* 2018).



a) ADAS rómbico (Shih y Sung 2005)



b) Disipador ranurado (Chan y Albermani 2008)

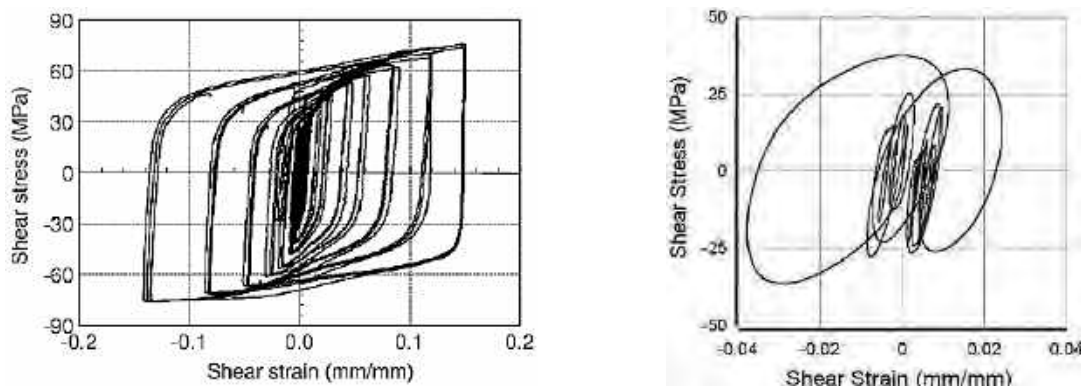


c) Fusible de acoplamiento (Lu *et al.* 2018)

Figura 2.1. Nuevas configuraciones geométricas de disipadores de energía

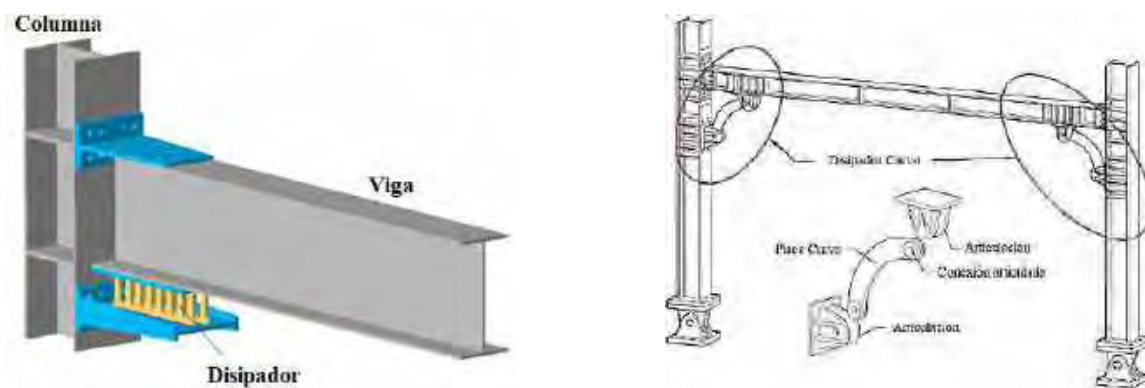
Otros investigadores han estudiado el uso de nuevos materiales para la creación de tales dispositivos. La forma de evaluar la eficacia de éstos lo realizan a partir de ensayos experimentales en diversas etapas; la primera de ellas, con protocolos cíclicos de desplazamientos (Sahoo y Rai 2010); y la segunda, con registros de aceleración inducidos a un modelo a escala desde una mesa vibradora (Rai *et al.* 2013).

En la primera etapa de la investigación, se muestran ciclos de histéresis estables para niveles de distorsión del 3.5% (figura 2.2a). No obstante, en la segunda etapa, cuando se evalúa el comportamiento del disipador ante un registro de aceleración escalado al 200% (figura 2.2b), se observa que su ciclo de histéresis no presenta un patrón de deformación propio de los disipadores por histéresis del material. Esto se debe, principalmente, a las variaciones en geometría y en los detalles de las conexiones, que son difíciles de controlar en modelos pequeños que están escalados. Por otra parte, existen investigaciones que no se limitan sólo a pruebas experimentales a nivel disipador, sino que a partir de los resultados de los experimentos evalúan también de manera analítica el comportamiento en marcos planos de distintas alturas (De la Llera *et al.* 2004).



a) Con protocolo de desplazamiento (Sahoo y Rai 2010) b) Con registro Taft al 200% (Rai *et al.* 2013)
 Figura 2.2. Respuesta esfuerzo-deformación de disipadores a cortante

Aunque desde hace muchos años se ha abordado la problemática de encontrar el lugar óptimo para la colocación de dispositivos disipadores de energía que sean capaces de mitigar los efectos traslacionales y/o torsionales de los sismos en las estructuras (por ejemplo, Wu *et al.* 1997), existen investigaciones que presentan propuestas de sistemas de disipación, que no necesariamente se encuentran colocados sobre sistemas de contraventeo chevrón o concéntrico. Por ejemplo, Oh y colaboradores propusieron en 2009 reforzar las conexiones viga-columna colocando disipadores de energía para que funcionen como una junta mecánica limitando la deformación plástica a dichos dispositivos (figura 2.3a). A diferencia de los disipadores soportados en sistemas de contraventeo, el mecanismo de carga para esta nueva conexión se rige por momento flexionante en lugar de fuerza cortante, lo cuál sería de gran utilidad para edificios muy flexibles (Oh *et al.* 2009). También se han propuesto disipadores de acero con forma curva colocada en la zona viga-columna (figura 2.3b). El comportamiento de estos dispositivos se rige por su longitud y el ángulo entre sus dos extremos; y se observó que la resistencia del marco aumentaba cuando el ángulo de los disipadores disminuía (Hsu y Halim 2017).



a) Dispositivo con ranuras (Oh et al. 2009)

Dispositivo curvo (Hsu y Halim 2017)

Figura 2.3. Propuesta de conexión viga-columna con disipadores de energía

Con base en el concepto de enfocar todo el comportamiento no lineal en las conexiones de elementos estructurales como si fuesen disipadores de energía, en Europa, se han estudiado y evaluado dispositivos de disipación de energía formados por una serie de placas de acero atornilladas al alma y al patín inferior de una sección “I”; esta conexión de disipación funciona en términos de rotación de la junta, al igual que el mencionado en el párrafo anterior. Aunque los diagramas de histéresis que desarrolla esta configuración se presentan estables, se observa un comportamiento de adelgazamiento del ciclo histerético debido al deslizamiento de los pernos y al pandeo de la placa (Castiglioni *et al.* 2012); también se observó que los especímenes con menor área transversal en las placas conectadas a los patines inferiores disipaban menos energía, independientemente de la esbeltez de las mismas (Calado *et al.* 2013).

Utilizando el principio comentado en el párrafo anterior, en el que una conexión sea capaz de absorber todo el comportamiento no lineal de la estructura, en la Universidad de Berkeley Qian desarrolló recientemente un estudio analítico para mejorar el comportamiento de muros a cortante contruidos a partir de placas de acero, adicionando una conexión a momento con placas *Gusset*. El objetivo principal de esta investigación era evitar el pandeo de los muros ante cargas por viento o por sismos frecuentes sin tener que recurrir a aumentar el espesor de la placa utilizada y con ello inducir grandes fuerzas laterales a la columna. Con la sustitución de la conexión soldada (comúnmente utilizado en este sistema), por la conexión con placas *Gusset*, se permitió que vigas y columnas se comporten elásticas en la mayoría de sus modelos evaluados (Qian 2017).

Actualmente, existen una serie de investigaciones que presentan propuestas de nuevos sistemas de disipación de energía por histéresis del material, motivados por el objetivo de crear uno que desempeñe su papel de manera eficiente, pero a un menor costo que los ya conocidos y ampliamente estudiados. Por otra parte, algunos investigadores han enfocado sus esfuerzos en proponer metodologías de diseño para reparación de estructuras o el diseño original de estructuras nuevas con la adición de sistema de control pasivo comentado en esta sección.

2.2 Estudios enfocados a reparación de estructuras

A nivel nacional, el uso de sistemas de control pasivos en estructuras surgió como una idea atractiva para reparar y reforzar inmuebles dañados por los sismos de septiembre de 1985. Aunque la idea inicial se enfocó en disipadores por fricción, debido a su alto costo por concepto de pago de patentes y los costos asociados a su mantenimiento, éstos no tuvieron aplicaciones en México (Tena 2003). Sin embargo, los disipadores de energía por histéresis del material llamaron la atención de los ingenieros de la práctica y de los investigadores sobre todo a raíz de su utilización en la reparación del edificio Izazaga 38-40 (figura 1.1).

Las primeras investigaciones en México se enfocaron a utilizar disipadores de energía como una alternativa para mejorar el desempeño de estructuras anteriormente reforzadas que seguían presentando problemas de choque con estructuras adyacentes (Tena *et al.* 1996). Dentro del marco de propuestas de reparación para edificios dañados por el sismo de septiembre de 1985 podemos desatacar aquéllas realizadas para mejorar el desempeño del edificio de Parque España (figura 2.4), donde se propuso adicionar dispositivos solera como una solución viable para reducir los desplazamientos laterales por incremento de su amortiguamiento interno. Los dispositivos solera se desarrollaron en la década de los 70s como una alternativa para controlar el hundimiento en edificios; dentro de sus componentes básicos están los elementos en forma de “U” elaborados con solera de acero estructural y que disipan energía al desplazarse a la manera de las orugas de un tractor (González 1990).

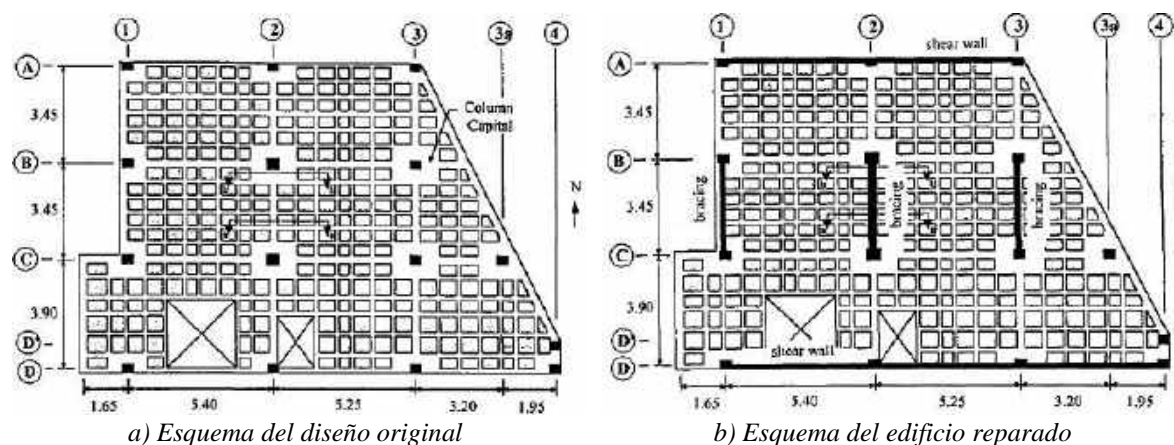


Figura 2.4. Vista en planta del edificio de Parque España (Tena *et al.* 1996)

Se realizaron también comparativas de reforzamiento, con dispositivos tipo ADAS (*Added Damping and Stiffness*, por sus siglas en ingles), para un edificio de oficinas ubicado cerca de la Alameda Central construido en la década de los 50s y reforzado con contraventeo metálico en la década de los 90s. Se demostró que el uso de disipadores tipo ADAS mejora notablemente el comportamiento dinámico del edificio, en comparación de la solución existente con contraventeo metálico. Sin embargo, en ese entonces el costo inicial del reforzamiento con disipadores de energía incrementa al doble aproximadamente en comparación con el uso de contravientos. Esto se debe principalmente por los costos que

involucran la transportación, instalación, impuestos aduanales y pago de patentes de los disipadores tipo ADAS; aunque esta comparativa de costos puede ser favorable para la solución con disipadores, sobre todo cuando se necesita reforzar la cimentación por efecto de utilizar secciones de contraventeo más robustos con el objetivo de evitar efectos de pandeo en estos elementos (Tena-Colunga y Vergara 1997).

Recientemente, en Ecuador y como consecuencia de daños en edificios después del sismo del 16 de abril en 2016, Aguiar ha propuesto el reforzamiento de diversas estructuras adicionando disipadores tipo TADAS. Dentro de estas propuestas se encuentran el reforzamiento del estacionamiento que pertenece a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), que presentó daños importantes en columnas sobre todo por efectos de columna corta en el eje donde concurren una serie de losas. Se propuso el uso de muros a cortante y de disipadores tipo TADAS (colocados en los ejes perimetrales) compuestas por seis placas, con el objetivo de disminuir los desplazamientos y aumentar el amortiguamiento de la estructura (Aguiar 2016). También existen propuestas para mejorar el desempeño estructural del hospital Rodríguez Zambrano de Manta, que a pesar de que no presentó daños en elementos estructurales, tuvo daños importantes en sus muros de mampostería. Aguiar presenta su propuesta de reforzamiento siguiendo una metodología de diseño basado en balances de rigidez entre los sistemas estructurales (abordada a detalle en secciones posteriores), con el objetivo de plantear la relación de rigidez entre marco y el sistema contraviento-disipador (Aguiar 2018).

Aunque existen diversas aplicaciones del uso de dispositivos de control de la respuesta sísmica para mejorar el desempeño estructural a partir de proyectos de rehabilitación o reforzamiento, pocos países cuentan dentro de su normatividad de construcción guías y parámetros de diseño explícitos para la utilización de disipadores de energía. Una de las primeras guías para la rehabilitación de edificios con el uso de disipadores de energía se encuentra dentro del documento de FEMA 273 (1997); en éste se establecen procedimientos lineales (estáticos y dinámicos), basados en la reducción del espectro de diseño por parámetros de amortiguamiento viscoso efectivo. Una de las limitantes más importantes para el uso de los procedimientos lineales en este documento, es que el amortiguamiento efectivo aportado por los disipadores no debe exceder del 30% del amortiguamiento crítico de la estructura en su modo fundamental. Por otra parte, los análisis no lineales (estáticos y dinámicos), pueden ser usados sin ningún tipo de restricción estableciendo un desplazamiento objetivo (estático no lineal) o a partir del uso de movimientos del terreno (dinámico no lineal paso a paso). Por último, la revisión de diseño debe incluir por lo menos un diseño preliminar que incluya el dimensionamiento de los dispositivos disipadores, pruebas experimentales de al menos dos prototipos por cada uno usado en el diseño, el diseño final de la estructura rehabilitada con análisis que lo soporten y un control de calidad para la fabricación de los disipadores (FEMA 273 1997).

Varios investigadores alrededor del mundo han presentado diversas metodologías para el reforzamiento y rehabilitación de estructuras desde distintos enfoques. Por ejemplo, se encuentran aquellos trabajos que utilizan criterios basados en desempeño, donde se destaca el trabajo de Ruiz y Badillo (2001); en este trabajo parten de simplificar a la estructura con un modelo representativo de un grado de libertad (1GDL), con los elementos disipadores conectados en paralelo. El sistema combinado fue sometido a una serie de registros de aceleración buscando reducir la distorsión máxima cuando los disipadores alcanzaban la mayor ductilidad aceptable. Posteriormente, aplicaron los criterios que obtuvieron de los resultados con los sistemas de 1GDL para extrapolarlo a un ejemplo de reforzamiento para un marco de concreto reforzado de 10 entrepisos con dispositivos solera (Ruiz y Badillo 2001).

Por otra parte, otros estudios se limitan a comparar resultados de métodos analíticos con los obtenidos de ensayos experimentales para una posible predicción del comportamiento global de la estructura reforzada con dispositivos ADAS. Por ejemplo, en Irán se probó experimentalmente la eficiencia de mejorar el comportamiento estructural de marcos de acero conectadas a través de una conexión llamada “*Khorjinee*”; esta conexión semirígida adquirió una gran popularidad entre los ingenieros de la práctica por su simplicidad y sus ventajas económicas, aunque su comportamiento no era el adecuado para resistir cargas laterales como se comprobó después del sismo de Manjil en 1990. De los resultados recabados experimental y analíticamente, se encontró que la adición de dispositivos ADAS en contraventeo con configuración chevrón es útil para controlar efectos de fatiga de bajo ciclaje (Tehranizadeh 2001).

Otros investigadores comparan dos sistemas de reforzamiento para un edificio de oficinas y una escuela; la primera propuesta basado en un sistema convencional de muros a corte y el segundo con uso de disipadores de tipo panel de cortante. Se analizaron las condiciones originales y reforzadas de los edificios a partir de análisis dinámicos no lineales para tres niveles de desempeño. Los resultados de los análisis demostraron un mejor desempeño para la propuesta de reforzamiento con disipadores de energía de panel de cortante, encontrando que para niveles de desempeño asociado a seguridad de vida y prevención de colapso, las distorsiones de entrepiso con disipadores son más pequeñas que para la propuesta con muros a corte (Durucan y Dicleli 2010).

En Italia, se propusieron metodologías de reforzamiento, basados también en principios de diseño por desempeño, para estructuras irregulares en planta y/o elevación con disipadores histeréticos. Para el reforzamiento de estructuras irregulares en planta, se efectuaron una serie de análisis estáticos no lineales variando el ángulo de aplicación del patrón de cargas horizontal. Para este propósito, se tomó de referencia el edificio de la alcaldía de Spilinga, que consta de dos entrepisos con planta en forma de “L”. Aunque de manera general se mejoró el comportamiento de la estructura, no se logró eliminar los efectos torsionales para los marcos que no se reforzaron con disipadores histeréticos (Mazza 2014).

Para la evaluación de reforzamiento de estructuras irregulares en elevación, se tomó de referencia un edificio de seis entrepisos simétrico en planta, pero con condiciones irregulares en peso provocado por el cambio de uso ocupacional en algunos niveles y del tipo de fachadas usadas (figura 3.5b). Se evaluaron las demandas de ductilidad de los distintos elementos estructurales involucrados, obtenidas a partir de una serie de análisis dinámicos paso a paso no lineales. Además, se compararon propuestas de reforzamiento con muros a cortante y disipadores histeréticos (Mazza *et al.* 2015).

Preocupados por las condiciones de irregularidad en elevación de las estructuras, Benavent y Mota han estudiado el uso de disipadores histeréticos para reforzar estructuras de concreto con problemas de piso suave. El procedimiento se basa en conceptos de energía, la cual nos proporciona resistencia, rigidez y capacidad de disipación requerida por los dispositivos disipadores con el objetivo de que el sistema global pueda soportar las demandas de desplazamiento impuestas por la amenaza sísmica. La resistencia requerida por los disipadores depende principalmente de la resistencia de las columnas del primer entrepiso, tomando en cuenta la deformación elástica de los entrepisos superiores en la energía de vibración elástica. Los investigadores revisan el comportamiento estructural a partir de las distorsiones máximas, distorsiones residuales y cortantes de entrepiso de modelos de tres y seis entrepisos representativos de la figura 2.5a (Benavent-Climent y Mota-Páez 2017).

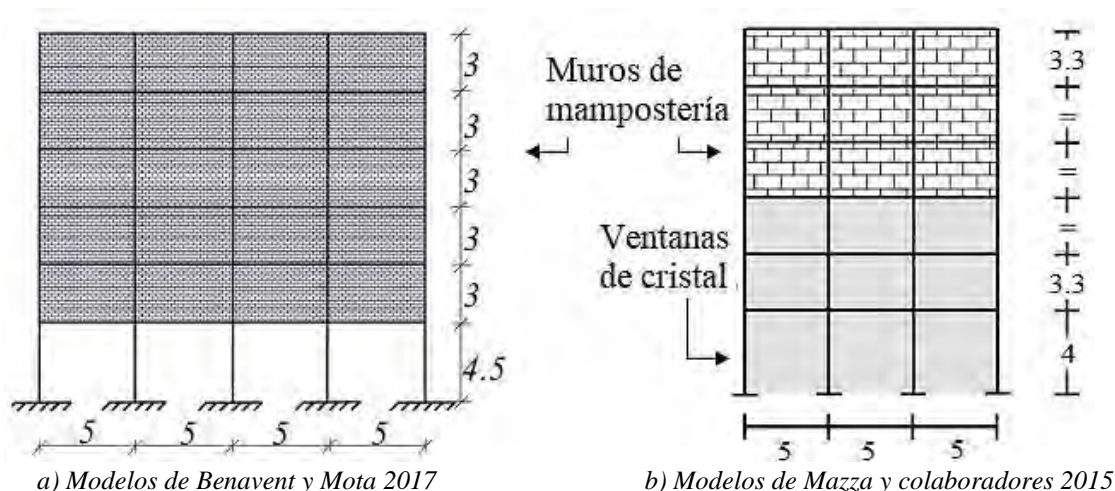


Figura 2.5. Modelos irregulares en elevación propuestos para reforzar con disipadores

Existen también metodologías de reforzamiento, basados en balances de energía, para determinar la resistencia y la rigidez lateral necesaria en la estructura para alcanzar niveles de desempeño prescritos para una amenaza sísmica dada; donde dicho nivel de amenaza está caracterizado en términos de energía de entrada y diversos parámetros sismológicos. Con la metodología propuesta, se obtiene el desempeño de los disipadores en términos de energía histerética, sin tener que recurrir a transformarla en amortiguamiento viscoso equivalente, lo cual permite cuantificar directamente el daño acumulado en dichos dispositivos. La validez de este método se evalúa tanto de manera analítica como experimental por medio de un ensaye en mesa vibradora (Benavent-Climent 2011).

Otras metodologías basadas en balances de energía utilizan análisis *pushover* modales para determinar la fuerza de fluencia y el factor de ductilidad para sistemas equivalentes de 1GDL. Este sistema equivalente se determina a partir de los dos modos de vibrar con mayores factores de participación modal del sistema de múltiples grados de libertad (SMGL). La contribución de energía de cada modo de vibrar se determina usando espectros de energía y sirve para calcular el tipo de dispositivo adecuado para reforzar la estructura original en términos de amortiguamiento viscoso equivalente y de rigidez efectiva (Habibi *et al.* 2013).

En Asia se volvió muy popular el uso de contravientos restringidos contra pandeo (BRB, por sus siglas en inglés), para proyectos de reparación de estructuras de concreto típicas de edificios escolares. Khampanit y colaboradores proponen en 2014 una metodología para estructuras con ductilidad limitada basada en dos ensayos experimentales y una serie de estudios analíticos. De los resultados obtenidos, se observaron daños en columnas cuando los BRBs se desempeñan en el intervalo no lineal (figura 2.6); a pesar de que en la metodología de diseño se limitan las distorsiones de entrepiso (Khampanit *et al.* 2014).

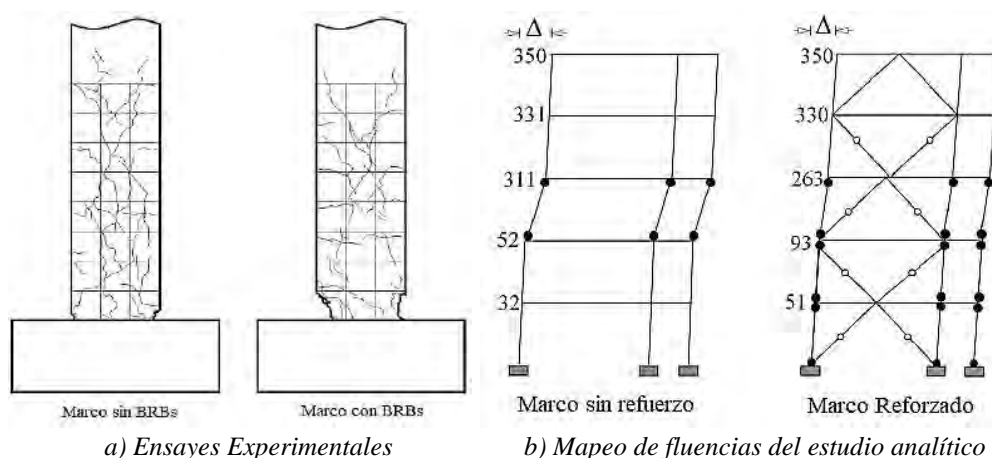


Figura 2.6. Daños a elementos de concreto reforzado no dúctil con BRBs (Khampanit *et al.* 2014)

Otro estudio que propone una metodología para reforzar escuelas con BRBs es el de Gang y colaboradores. Esta investigación surge de la preocupación de los daños reportados del sismo de Wenchuan en 2008, a estructuras que no cumplían con las especificaciones del código nacional chino emitidos en ese mismo año. Esta metodología está basada en la reducción del espectro de diseño sísmico y partieron de un estudio analítico de modelos de 1GDL (basados en el trabajo de Vargas y Bruneau del 2009), donde evaluaron la influencia de tres parámetros principalmente; la relación de rigidez entre el marco principal y la del BRB, la relación entre la resistencia fluencia y la fuerza inercial máxima inducida por un registro de aceleración dado, y la de la ductilidad del sistema del marco principal. Después extrapolaron la metodología a un marco plano y finalmente lo probaron para reforzar de manera exitosa una escuela con cinco entrepisos de concreto reforzado (Gang *et al.* 2015).

En Europa también se ha evaluado el uso de BRBs para el reforzamiento de edificios escolares de concreto reforzado al menos desde el 2010, debido a los daños causados por el sismo de L'Aquila en 2009. Las estrategias utilizadas se basan en el uso de un amortiguamiento viscoso equivalente para cuantificar la respuesta histerética global del sistema estructural. Aunque algunos investigadores utilizan este amortiguamiento equivalente para escalar el espectro de respuesta de aceleración o desplazamiento (Di Sarno y Manfredi 2010); otros la utilizan para calcular respuestas máximas en términos de desplazamiento y aceleración de sistemas equivalentes de 1GDL (Almeida *et al.* 2017), partiendo de trabajos precursores de Kasai y colaboradores en 1998, donde predicen y comparan el desempeño sísmico de estructuras con dispositivos viscoelásticos y elastoplásticos (Kasai *et al.* 1998). Almeida y colaboradores encontraron un defecto en la metodología propuesta, ésta radica en que las deformaciones laterales se concentran en el entrepiso más flexible y, por ende, la participación no lineal de los BRBs es desigual en todos los entrepisos.

A pesar de que las metodologías expuestas a lo largo de esta sección parten de diferentes hipótesis y conceptos para el uso de disipadores de energía para reforzar estructuras existentes, la mayoría de estas surgen después de un sismo de gran magnitud y como consecuencia de los daños reportados por los mismos. Las diversas propuestas las podemos clasificar dentro de tres grandes grupos principalmente:

- a) Aquéllas que utilizan criterios de diseño por desempeño.
- b) Las que emplean conceptos de balances de energía.
- c) Las que usan factores de reducción del espectro de diseño sísmico.

Todas ellas tienen como objetivo mejorar el desempeño estructural con la reducción de desplazamientos y aceleraciones a través del incremento de la rigidez y del amortiguamiento o comportamiento histerético controlado.

2.3 Estudios orientados al diseño inicial de estructuras

Dentro de las investigaciones analíticas desarrolladas con disipadores de energía por histéresis de material, existen aquéllas que se han enfocado en proponer nuevas metodologías de diseño a partir de diversos enfoques como se ha comentado en la sección anterior. Existen investigaciones que proponen métodos de diseño basados en desplazamiento para edificios nuevos y regulares con el objetivo de predecir su comportamiento no lineal. En dicha metodología se propone un desplazamiento objetivo y se supone un desplazamiento de fluencia para la estructura representada como un sistema de 1GDL. El dispositivo de disipación a utilizar se propone en términos del amortiguamiento viscoso equivalente y de la rigidez efectiva a través de un método iterativo de racionalización lineal (Lin *et al.* 2003).

Con base en el concepto mencionado en el párrafo anterior, se han desarrollado también metodologías para el comportamiento y diseño de estructuras con BRBs. Como etapa inicial, se buscó cual era el esfuerzo de fluencia óptimo de los BRBs para el cual se maximizaba el amortiguamiento viscoso equivalente. De manera general se observó que el amortiguamiento equivalente se incrementa cuando la rigidez del BRB se incrementa también. Por otra parte, se reporta que el esfuerzo de fluencia óptimo decrece conforme la rigidez del BRB incrementa y la demanda de ductilidad decrece. En la segunda etapa se probaron diferentes configuraciones de distribución de los BRBs a lo largo de la altura de modelos de MGD, observándose que una distribución basada en distorsiones o cortantes de entrepiso tenían un mejor desempeño estructural (Kim y Choi 2004).

En Canadá, se han desarrollado una serie de investigaciones para evaluar el comportamiento de estructuras con BRBs y recomendar parámetros de diseño para su implantación en el código canadiense. Dentro de este marco se han evaluado ensayos experimentales con el objetivo de reducir la longitud del corazón del BRB para incrementar la rigidez axial del elemento. Además, analíticamente se ha comparado el desempeño estructural de una estructura de tres entrepisos de acero con BRBs y con el uso de contraventeo convencional. Se demostró que el sistema con los BRBs reduce las fuerzas de diseño en comparación con el otro sistema evaluado; sin embargo, las demandas inelásticas tienden a concentrarse en la planta baja del modelo teniendo como consecuencia que las deformaciones en los corazones de los BRBs excedieran los valores de diseño (Tremblay *et al.* 2004).

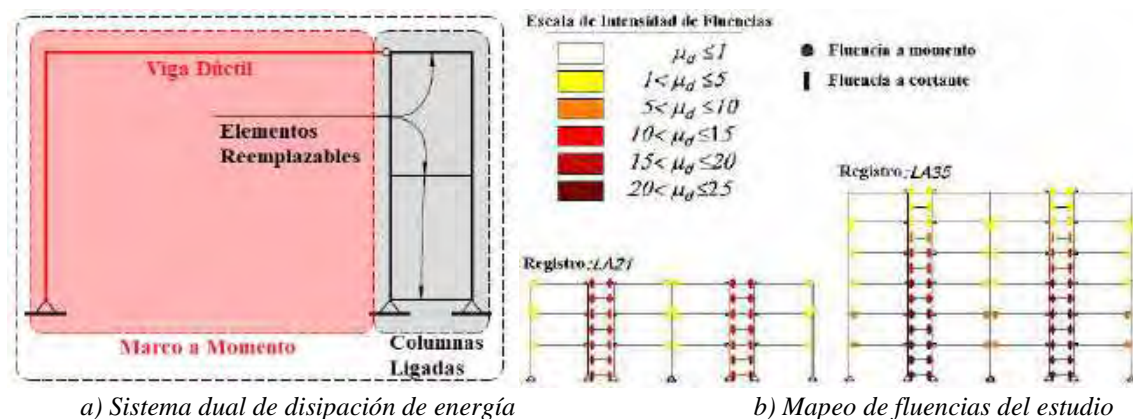
En 2014 se evaluó el desempeño sísmico de sistemas de contraventeo ligados de manera modular a edificios de múltiples niveles con disipadores de energía. Este sistema TBF (por sus siglas en inglés, “*Tied Braced Frame*”), se desarrolló con el objetivo de que la participación inelástica se distribuyera de manera uniforme sobre toda la altura del edificio mientras se reducían las demandas axiales impuestas a los miembros. Los parámetros de interés evaluados fueron las distorsiones de entrepiso y las fuerzas verticales en los elementos de liga verticales. Observaron que los sistemas TBF son efectivos para obtener distorsiones de entrepiso uniformes y rotaciones inelásticas localizadas exclusivamente en los elementos verticales de liga, causadas por las grandes fuerzas axiales desarrolladas en los contravientos. Estas fuerzas pueden reducirse de manera considerable si se emplea la modulación del edificio, pero tiene como consecuencia variaciones considerables de distorsiones entre los pisos adyacentes a los módulos. El uso de disipadores de energía del tipo BRB en conjunto con un sistema modulado mejoran la respuesta estructural desde el punto de vista de las distorsiones; además, se demostró que el uso de este tipo de dispositivo desarrolló menores deformaciones axiales permitiendo un mejor control de las rotaciones entre módulos adyacentes (Tremblay *et al.* 2014).

Se han elaborado también metodologías para el diseño de estructuras de concreto reforzado con disipadores de energía tomando en cuenta la fuerza fluencia para cada mecanismo seleccionado como dispositivo de control (disipadores por fricción o ADAS). Se evaluó la variación de la fuerza de fluencia seleccionada en 50%, 75% y 100% generadas por la fuerza estática lateral equivalente recomendada por la UBC-91. Aunque el uso de cualquier tipo de dispositivo usado reduce las distorsiones de entrepiso en comparación con un sistema sin elementos de disipación de energía, los disipadores por fricción empezaron a comportarse en el intervalo no lineal a niveles de distorsión más pequeños que los disipadores ADAS (Foti *et al.* 1998)

Otras investigaciones se han enfocado en evaluar parámetros de diseño sísmico de sobrerresistencia y de ductilidad para marcos a momento con disipadores TADAS (*Triangular-plate Added Damping And Stiffness*). A través de los resultados de análisis no lineales, se proponen valores para los parámetros antes mencionados y se encontró que conforme el número de entrepisos incrementa, la magnitud de dichos valores decrece; no obstante, el desempeño de los modelos con disipadores TADAS fue mucho mejor que el de los modelos sin estos dispositivos (Mahmoudi y Abdi 2012).

En Irán se presentó un estudio analítico de marcos con contravientos y disipadores de panel de cortante para determinar los parámetros clave que influyen en el comportamiento cíclico y en su capacidad de disipar energía. Estos investigadores evaluaron de manera local la rigidez lateral del dispositivo ante diferentes demandas de deformación inelástica con el objetivo de seleccionar sus propiedades geométricas ante un nivel de ductilidad deseada. Finalmente, probaron los resultados analíticos en cinco ensayos experimentales para verificar y validar su metodología, alcanzando una relación de amortiguamiento histerético aproximadamente del 30% (Zahrai y Moslehi 2013).

En los últimos años, un grupo de investigadores se han dedicado a evaluar el comportamiento de estructuras duales en la que una de ellas disipe energía y la otra permanezca elástica durante un evento sísmico. La metodología de diseño plástico fija criterios de desempeño en función de la amenaza sísmica latente donde la más crítica de éstas, permite comportamiento no lineal en todos los elementos del sistema dual. Se estudiaron modelos de MGD L determinando una distorsión objetivo y diseñando cada uno de los sistemas involucrados por separado considerando criterios de columna fuerte – viga débil (figura 2.7a). Del mapeo de fluencias inelásticas (figura 2.7b), se aprecia que las vigas de liga presentan las mayores demandas de deformación inelástica, algunas de las vigas diseñadas como dúctiles presentan fluencia inelástica nada despreciables (menores a 10) y la mayoría de las columnas presentan comportamiento elástico (Shoeibi *et al.* 2017).



Existen metodologías dirigidas a estimar la distorsión de entrepiso máxima de estructuras de acero con disipadores de energía, tomando en cuenta espectros de desplazamiento inelástico a partir de sistemas equivalente de 1GDL, modos de vibrar inelásticos y la influencia de sus modos superiores. El objetivo principal de este tipo de metodologías es considerar el cambio de los vectores modales elásticos a inelásticos, causados por la fluencia de los miembros estructurales en el sistema, sobre todo en el intervalo de grandes deformaciones (Kang y Mori 2017). Otros estudios presentan procedimientos de diseño sísmicos basados en balances de energía para estructuras con sistemas de disipación de energía. Este procedimiento permite a los ingenieros seleccionar diferentes objetivos de diseño en función de la magnitud del sismo supuesto. Dicha metodología se probó en una estructura con base en marcos a momento con armaduras y BRBs en los extremos de ésta última (originalmente propuesta por Wongpakdee, Yang y colaboradores). Para asegurar que este sistema tenga la suficiente rigidez y resistencia después de que el BRB fluya, se usa una conexión a momento entre las cuerdas superiores y la columna de acero como un segundo sistema de disipación (Yang *et al.* 2018).

A lo largo de los párrafos anteriores, se ha descrito el esfuerzo de diversos investigadores para proponer metodologías de diseño para proyectos nuevos o de reforzamiento con sistemas de disipación de energía para mejorar el comportamiento estructural global. A pesar de que existen numerosas investigaciones que ayudan a acrecentar el acervo ingenieril del uso de sistemas para el control de la respuesta sísmica, a lo largo del mundo se siguen observando daños estructurales importantes después de un evento sísmico de gran magnitud. Por esta razón, es importante proponer metodologías de diseño que sean de fácil integración a los códigos de diseño y con ello promover el uso de los dispositivos de disipación de energía bajo un marco legal. El presente trabajo basa su enfoque de diseño de los disipadores a partir de un balance de rigidez entre los diferentes sistemas estructurales involucrados (marco-contraviento-disipador); por ello se dedica la siguiente sección en exponer las investigaciones más importantes reportadas con dicho enfoque de diseño.

2.4 Metodologías de diseño con balances de rigidez

La idea de usar balances de rigidez como propuesta de metodología de diseño la han empleado diversos investigadores, y quizás fue iniciada a nivel mundial por Ciampi y colaboradores (1992 y 1995). En estas investigaciones se estudiaron el diseño de disipadores de energía para estructuras nuevas o como alternativa de rehabilitación de estructuras existentes; empleándose modelos de 1GDL con comportamiento elasto-plástico para representar el comportamiento no lineal a través de curvas trilineales (figura 2.8). El principal objetivo de esta idealización trilineal es observar la suma de la contribución de cada uno de los sistemas por separado. En la figura 2.8 se tiene una representación de la respuesta de un modelo de 1GDL con disipadores de energía; a partir de ésta, se observa que el sistema contraviento-disipador aporta mayor rigidez y resistencia que el sistema del marco. Por otra parte, se espera que el comportamiento no lineal se concentre exclusivamente en el sistema de disipación, aunque se podría esperar participación no lineal incipiente en el sistema del marco ante grandes deformaciones.

La metodología de diseño incluye variables de relaciones de desplazamientos de fluencia entre el contraviento y el marco (α), y relaciones entre el periodo elástico (después de una rehabilitación) y el periodo original (β). Después de evaluar los resultados para los sistemas de 1GDL, los investigadores extrapolaron la metodología para sistemas con MGDL en marcos de tres y seis niveles (modelado como una estructura a cortante), con misma masa y altura para cada uno de los entresijos (figura 2.9).

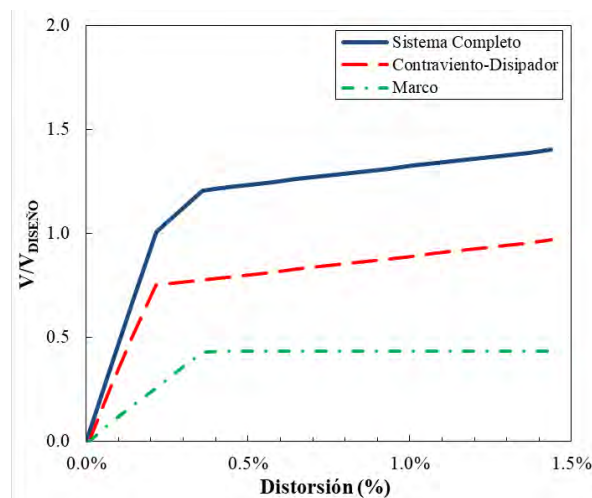


Figura 2.8. Comportamiento Cortante-Distorsión de modelos de 1GDL con disipadores de energía

Los investigadores encontraron que diseñar una estructura nueva con el mismo espectro de respuesta, en comparación con una estructura rehabilitada, proporciona mayor nivel de seguridad sísmica. Además, la aplicación de la metodología para sistemas de MGDL requiere que se distribuya de manera apropiada la rigidez y la fuerza de fluencia en cada uno de los entresijos, para favorecer la participación uniforme de los disipadores de energía y evitar concentraciones de daño (Ciampi *et al.* 1992).

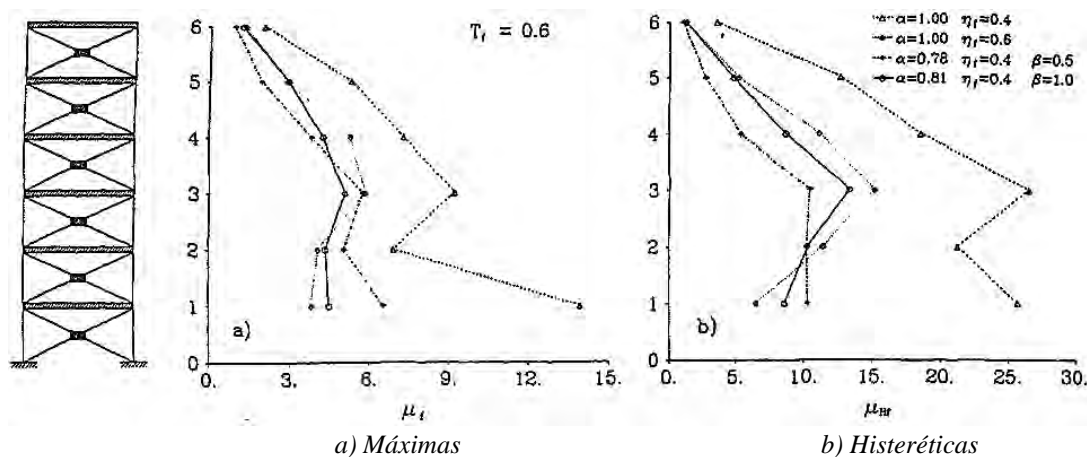


Figura 2.9. Ductilidades de entepiso (Ciampi, Paolone y De Angelis 1992)

En el mismo año 1992, Xia y Hanson estudiaron y compararon el desempeño de estructuras con disipadores de energía tipo ADAS con base en parámetros de desplazamiento y fuerza de fluencia de los dispositivos, relaciones de endurecimiento por deformación, relaciones de rigidez entre el dispositivo y el contraviento y relación de rigidez del dispositivo y la rigidez del entepiso sin el disipador. Los marcos evaluados en este estudio consistieron en tres modelos numéricos de diez niveles nombrados como se detalla a continuación:

- WMAN, marcos resistentes a momento con contraventeo concéntrico
- AKKCM, marcos resistentes a momento con masa de azotea tres veces mayor en comparación con la de los entepisos
- AKKUM, marcos resistentes a momento con masas uniformemente distribuidas en los entepisos

Se seleccionaron tres registros de aceleración (El Centro, México SCT y Miyagi-Ken-Oki), para cubrir un amplio intervalo de periodos y se observó que al incrementar la fuerza de fluencia del disipador se incrementa la resistencia de éste, así como la capacidad de disipar energía para un mismo desplazamiento dado. Lo cual, desde el punto de vista de disipación de energía es satisfactorio, aunque las consecuencias de una fuerza de fluencia alta es que la demanda de capacidad para los elementos de soporte es mayor y con ello el aumento en costos, incluso, del disipador mismo (Xia y Hanson 1992).

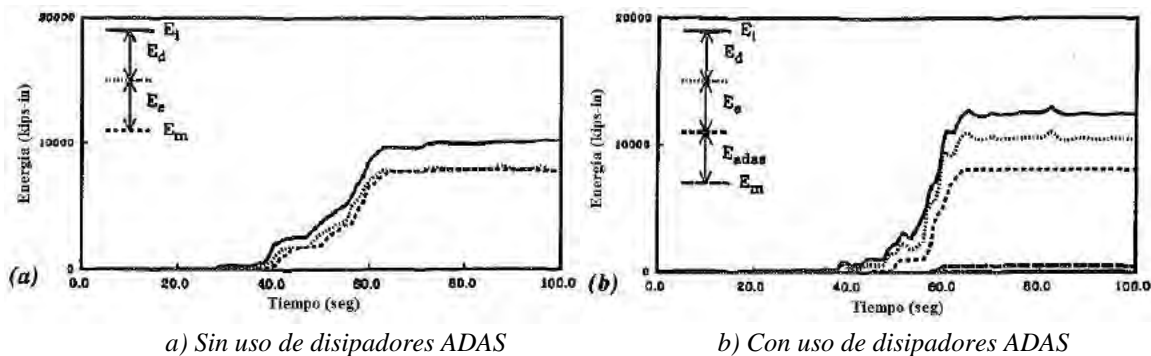


Figura 2.10. Historias de energía para modelos WMAN (Xia y Hanson 1992)

En la figura 2.10 se aprecia la diferencia de disipación de energía entre sistemas sin disipadores (figura 2.10a) y sistemas con disipadores de energía (figura 2.10b). Los resultados de la primera figura muestran que una gran cantidad de energía es disipada por los elementos estructurales (E_m), que dependiendo del movimiento del terreno oscila entre el 50% al 80% de la energía total. Por el contrario, la energía disipada por los dispositivos ADAS en la figura 2.10b es sustancialmente más grande en comparación de la energía total disipada.

En este sentido, uno de los primeros trabajos desarrollados en México con este criterio para sistemas estructurales con disipadores de energía fue el presentado por Esteva y Veras (1998). Ellos resaltan que para sistemas mixtos (marcos resistentes a momento y disipación de energía), describir las propiedades de sus elementos estructurales con base exclusivamente en su amortiguamiento efectivo es incompleto, ya que además del incremento de esta propiedad, el sistema completo sufre cambios en su rigidez y resistencia (Esteva y Veras 1998). Esteva y Veras destacan la importancia de identificar los diferentes niveles de ductilidad que pueden llegar a desarrollar los múltiples elementos del sistema estructural mixto, mediante una ductilidad equivalente y el empleo de un conjunto de espectros de diseño. Los dos parámetros principales que evalúan son denotados por las letras “ α ” y “ β ”, que representan cocientes de balances de rigidez y de resistencia entre el disipador y el marco respectivamente. No obstante, los resultados de este estudio paramétrico están orientados a una filosofía de diseño basados más en confiabilidad y en índices de daño.

La investigación de Jara, Miranda y Ayala publicada en 2007, se llevó a cabo con sistemas de 1GDL, representado esquemáticamente por un dispositivo disipador de energía montado a un sistema de contraventeo y el sistema combinado está ligado a un marco resistente a momento de un solo nivel, con dos columnas conectadas por una viga rígida. Las columnas fueron modeladas con comportamiento elastoplástico y una rigidez elástica K_f . La rigidez lateral de los modelos depende de la rigidez lateral del marco (K_f), de la rigidez de los contravientos (K_b) y de los disipadores de energía (K_d).

Se llevaron a cabo análisis dinámicos no lineales con tres variaciones básicas del modelo, el de marco resistente a momento (MF), marco con disipador de energía (FD) y marco con contraviento elástico lineal (BRF). La rigidez lateral del modelo BRF es la misma que la del modelo FD para comparar el comportamiento de los sistemas con misma rigidez (mismo periodo), pero con y sin disipación de energía. Los parámetros estudiados se resumen en la tabla 2.1 y son los siguientes:

- a) Periodo de vibrar de la estructura primaria, T (marco resistente a momento).
- b) Relación de rigidez lateral entre sistema contraviento-disipador y sistema del marco (K_{bd}/K_f).
- c) Relación de rigidez entre el contraviento y el disipador (K_b/K_d).
- d) Relación de desplazamiento de fluencia entre el marco y el disipador (Δ_{yf}/Δ_{yd}).

Tabla 2.1. Resumen de parámetros evaluados por Jara, Miranda y Ayala (2007)

K_{bd} / K_f	K_b / K_d	$\Delta_{yf} / \Delta_{yd}$	T
1.0	0.5	0.5	0.50
1.5	1.0	1.0	1.00
2.0	1.5	1.5	1.50
3.0	2.0	2.0	2.00
5.0	3.0	3.0	2.50
	5.0	4.0	3.00
		5.0	
		10.0	

El estudio consideró cuatro registros de aceleración típicos de terreno blando que se presentaron a lo largo de la zona de subducción del Pacífico mexicano (SCT-85, JAL1, JAL2, JAL3). En general, se distinguieron tendencias en los resultados dependiendo de la relación T/T_s , que se detallan a continuación:

- Cuando el periodo del marco se encuentra en la rama ascendente ($T/T_s < 1.0$), las demandas de ductilidad del marco decrecen con el incremento del valor K_{bd}/K_f . Para mantener demandas de ductilidad pequeñas en el marco, se recomienda utilizar valores de $2.0 \leq K_{bd}/K_f \leq 3.0$, $K_b/K_d \leq 2.0$ y $4.0 \leq \Delta_{yf}/\Delta_{yd} \leq 5.0$.
- Cuando el periodo del marco es igual al periodo del suelo ($T/T_s = 1.0$), existen diversas combinaciones que conllevan a comportamientos inelásticos menores en la estructura primaria (principalmente para valores muy pequeños de K_{bd}/K_f). Para el buen funcionamiento de estructuras con disipadores de energía en este intervalo de periodo, se sugiere el uso de los siguientes valores; $3.0 \leq \Delta_{yf}/\Delta_{yd} \leq 5.0$, $1.0 \leq K_{bd}/K_f \leq 3.0$, $K_b/K_d \leq 2.0$.
- Cuando el periodo del marco se encuentra en la rama descendente ($T/T_s > 1.0$), se observó que para valores altos de Δ_{yf}/Δ_{yd} permiten una incursión más temprana del marco a deformaciones inelásticas, por lo que se recomienda utilizar valores entre $3.0 \leq \Delta_{yf}/\Delta_{yd} \leq 4.0$. A pesar de la relación de rigidez utilizada entre los diferentes sistemas, se encontró que para este caso las demandas de ductilidad obtenidas no varían significativamente, por lo que se plantea que el uso de sistemas con disipadores de energía son más efectivas para estructuras donde su periodo dominante es igual o menor al periodo dominante del suelo.

En los trabajos de Vargas y Bruneau (2006 y 2009), se propuso una formulación paramétrica basada en los resultados de análisis estáticos no lineales para sistemas de 1GDL con sistemas de disipación de energía a través del concepto de “fusible estructural”. Se definieron dos parámetros para esta investigación; la primera de ellas, la relación de rigidez entre el marco y la rigidez inicial total del sistema “ α ”; la segunda, la relación de desplazamientos entre el marco Δ_{yf} con respecto al desplazamiento de fluencia de los fusibles Δ_{ya} ($\mu_{max} = \Delta_{yf}/\Delta_{ya}$).

Basados en la variación de los dos parámetros antes mencionados, se encontró la tendencia que la contribución del marco a la capacidad de cortante basal total del sistema incrementa cuando α y μ_{max} también se incrementan. Además, se emplearon análisis dinámicos no lineales utilizando tres registros de aceleración sintéticos representativos de suelos firmes. En total se realizaron 864 análisis dinámicos no lineales paso a paso cubriendo la variación de parámetros elegidos, que se resumen en la tabla 2.2, donde η es la relación de resistencia entre la resistencia a fluencia y la fuerza máxima del suelo aplicada durante el movimiento.

Para valores de $T > 1.0$ y $\eta > 6.0$, la estructura permanece completamente elástica y los disipadores sólo proporcionan una rigidez adicional sin disipar energía, con lo que contradice la filosofía de diseño de estos fusibles estructurales. No obstante, para valores de $\eta = 0.2$, es irreal asignar un valor apropiado de relación de rigidez α . Por otra parte, de los dos parámetros principales evaluados en esta investigación, se encontró que los valores óptimos se encuentran para $\alpha \geq 0.25$ y $\mu_{max} \geq 5$. Es decir, que el sistema del marco tiene que aportar al menos el 25% de la rigidez total del sistema global para que los disipadores funcionen de manera eficiente.

Tabla 2.2. Resumen de parámetros evaluados por Vargas y Bruneau (2009)

α	Δ_{yt}/Δ_{ya}	η	T
0.05	10.0	0.2	0.10
0.25	5.00	0.4	0.25
0.50	2.50	0.6	0.50
	1.67	1.0	1.00
			1.50
			2.00

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos en la evaluación de sistemas de 1GDL, se empleó un modelo del programa de investigación SAC de tres niveles con siete crujías en la dirección N-S y cinco en la dirección E-O y BRBs. Se eligieron valores iniciales de diseño de $\alpha=0.25$, $\mu_{max}=5$ y $\eta=0.25$. A partir de estos parámetros elegidos se diseñaron los elementos del marco y del disipador para que cumplieran valores de resistencia asociados al cortante basal. De los análisis modal espectral y de los estáticos no lineales se encontró una desviación significativa de los parámetros propuestos contra los obtenidos de dichos análisis ($\alpha=0.42$, $\mu_{max}=2.92$ y $\eta=0.30$). Estas variaciones se deben principalmente a que todas las aproximaciones para obtener los valores iniciales se realizaron para modelos de 1GDL y se comprobó la efectividad de los mismos en modelos de MGD. Aunque se presentó esta variación de parámetros, el modelo de estudio presentó un comportamiento satisfactorio para la filosofía con la que se diseñó, el cual especifica que la no linealidad se debe concentrar exclusivamente en los disipadores.

En 2009 Jara presentó un estudio que se enfocó en la reparación de edificios con dispositivos de disipación de energía por fluencia del material situados en suelos blandos. Él evaluó la respuesta de modelos de seis, 15 y 30 niveles e hizo énfasis en utilizar parámetros para controlar resistencia y rigidez de la estructura global y de los disipadores, a través de análisis dinámicos paso a paso usando movimientos sísmicos representativos de terrenos blandos. Los modelos evaluados fueron diseñados conforme a las Normas Técnicas Complementarias de Concreto Reforzado del Distrito Federal, utilizando un comportamiento sísmico de cuatro ($Q=4$). Por cada estructura a evaluar se propusieron tres modelos diferentes considerando sólo marcos a momento (MRF), marcos con contraviento (BRF) y marcos con disipadores de energía (EDF), aunque estos dos últimos modelos se afectaron todas las crujías con el sistema de refuerzo antes mencionado. Los modelos MRF se evaluaron mediante análisis estáticos lineales para el dimensionamiento de los elementos estructurales, respetando que los modelos cumplieran con la distorsión máxima permisible de 0.012.

Basado en los resultados del estudio con sistemas de 1GDL, se eligieron parámetros que fueran representativos de los modelos evaluados que se resumen en la tabla 2.3 y se enumeran a continuación:

- a) Relación de rigidez lateral entre el sistema contraviento-disipador y el marco (K_{bd}/K_f)
- b) Relación de rigidez entre el contraviento y el disipador (K_b/K_d)
- c) Relación de desplazamiento de fluencia entre el marco y el disipador (Δ_{yf}/Δ_{yd})

Tabla 2.3. Resumen de parámetros evaluados por Jara (2009)

Niveles	K_{bd}/K_f	K_b/K_d	Δ_{yf}/Δ_{yd}
6	0.5	1	2.0
15	2.0	5	3.0
30	3.5		4.0
	5.0		5.0
	6.5		6.0
			7.0
			8.0
			10.0

De las distintas combinaciones posibles, se presentan los resultados con base en qué relaciones de parámetros presentan mejor desempeño sísmico para cada uno de las diferentes alturas de los modelos. Por ejemplo, para los modelos de seis niveles, que por lo general son estructuras que se encuentran en la parte ascendente del espectro de diseño, se sugiere utilizar la misma relación de rigidez entre el contraviento y el disipador ($K_b/K_d=1.0$), incrementando al menos en 2.5 la rigidez del marco ($K_{bd}/K_f > 2.5$), y seleccionando una relación de desplazamientos de $5 < \Delta_{yf}/\Delta_{yd} < 10$. Para los modelos de 15 niveles, estructuras que se encuentran cerca de la zona de resonancia por su cercanía con el periodo fundamental del suelo, se sugiere utilizar una relación de rigidez entre el contraviento y el disipador de $K_b/K_d = 1.0$, una relación entre marco y sistema contraviento-disipador de $K_{bd}/K_f \geq 4.5$, y seleccionando una relación de desplazamientos de $3 < \Delta_{yf}/\Delta_{yd} < 4$.

Para los modelos de 20 niveles, estructuras que se encuentran en la zona descendente del espectro, presentaron demandas de ductilidad moderadas, y la adición de contraviento y/o disipadores tuvieron una influencia limitada en la respuesta sísmica global. Los parámetros que más se adecuaron a la filosofía de diseño de estructuras con disipadores se obtuvieron cuando se utilizaron una relación de rigidez entre marco y sistema contraviento-disipador de $K_{bd}/K_f = 2.0$, y seleccionando una relación de desplazamientos de $\Delta_{yf}/\Delta_{yd} = 10$.

Desde 2010, una serie de investigaciones analíticas se han llevado a cabo por ingenieros de la Universidad Autónoma Metropolitana enfocadas en proponer parámetros globales de diseño sísmico, que puedan implementarse de manera práctica a las normatividades vigentes del país (Nangullasmú 2011, Tena y Nangullasmú 2013, Tena-Colunga y Nangullasmú-Hernández 2015, Tena y Hernández 2017, Tena y Gama 2017). En estas investigaciones se consideraron diferentes balances de rigidez elásticas entre el disipador y los contravientos de soporte (β). Además, a partir de los resultados observados en distintas investigaciones experimentales con este tipo de dispositivos, se evaluaron las pendientes posteriores a fluencia (K_2) de los disipadores, incluyendo aquéllos que se idealizan como elastoplásticos perfectos, y para pendientes de 3% y 5%, cubriendo de manera práctica el intervalo de valores reportados en investigaciones experimentales (Whittaker *et al.* 1989, Aguirre y Sánchez 1992, Tsai *et al.* 1993). Asimismo, se consideraron dos ángulos de inclinación de los contravientos con respecto al eje horizontal (θ): 40° y 45°, considerando alturas de entrepiso y claros típicos usados en la práctica ingenieril mexicana. En total se han realizado más de 1,000 diseños y análisis estáticos no lineales a modelos de MGDL cubriendo la variación de parámetros elegidos que se resumen en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Resumen de parámetros evaluados
(Tena y Nangullasmú 2013 Tena y Hernández 2017, Tena y Gama 2017)

Niveles	$\alpha=K_{marco}/K_{total}$	$\beta=K_{disip}/K_{cv}$	K_2	θ
5	0.25	0.25	0.00	45°
10	0.50	0.50	0.03	40°
15	0.75	0.75	0.05	
20		1.0		
25				

La principal diferencia entre las investigaciones antes mencionadas se enfoca en evaluar las diferentes configuraciones de materiales estructurales más utilizadas a nivel mundial. Tena y Nangullasmú evaluaron marcos planos de concreto reforzado con ductilidad limitada; en otras palabras, diseñaron los elementos del marco con los requisitos de un factor sísmico de $Q=2$. Tena y Gama evaluaron marcos planos de concreto reforzado completamente dúctiles; es decir, diseñaron los elementos del marco con los requisitos de un factor sísmico de $Q=4$. Finalmente, el trabajo de Tena y Hernández se enfocó en el diseño de marcos de acero estructural completamente dúctiles. Para todos los trabajos antes mencionados, se aseguró el mecanismo de columna fuerte – viga débil para el diseño de estos elementos.

De manera general, se observó que la pendiente posterior a la fluencia de los disipadores (K_2) tiene un impacto importante en el comportamiento de los sistemas en estudio. Se distingue que, en general, la ductilidad que pueden desarrollar los disipadores diseñados y modelados como elastoplásticos es menor que la que desarrollan los disipadores con comportamiento bilineal; es decir, a medida que K_2 aumenta, la ductilidad desarrollada por el disipador también tiende a aumentar. Sin embargo, el desempeño de los disipadores con una pendiente posterior a la fluencia del 3% ó el 5% de su rigidez elástica es bastante similar.

Evaluando el balance de rigidez elástico entre el disipador histerético y el contraviento, se observa que conforme el balance β disminuye, es decir, que el disipador es más flexible que el contraviento, la ductilidad desarrollada por los disipadores de energía tiende a aumentar, pero también puede liderar a que los elementos del marco de concreto reforzado (vigas y columnas) trabajen inelásticamente, sobre todo en los modelos de concreto reforzado (Tena y Nangullasmú 2013, Tena y Gama 2017).

En la figura 2.11 se representan a partir de una escala de colores la magnitud de las fluencias inelásticas usada para los modelos de concreto reforzado con ductilidad limitada. Comparando los diversos mapeos de fluencia desarrollados por los modelos de concreto, se observó que considerar un balance de rigidez demasiado flexible del disipador en comparación con la del contraviento de soporte ($\beta=0.25$), conlleva a la formación de posibles pisos débiles en los entrepisos donde los disipadores desarrollan las mayores ductilidades (figura 2.13a). Para la mayoría de los modelos, el balance “óptimo” de β corresponde cuando la rigidez del disipador es por lo menos la mitad de la rigidez del contraviento ($0.5 \leq \beta \leq 1.0$).

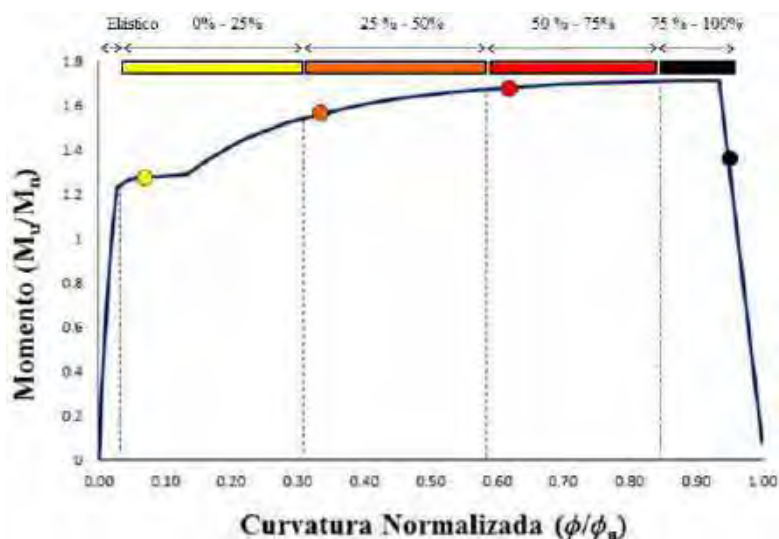
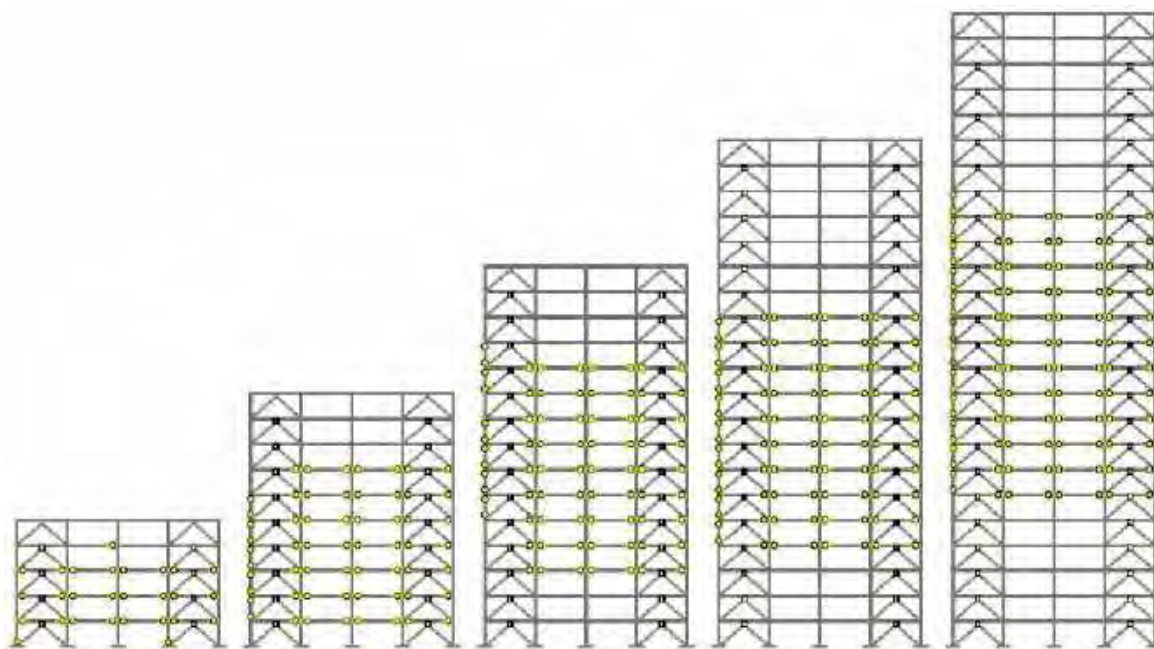


Figura 2.11. Escala de colores para el mapeo de fluencias inelásticas de vigas y columnas



a) $\alpha=0.25, \beta=0.50$ b) $\alpha=0.25, \beta=0.50$ c) $\alpha=0.25, \beta=0.50$ d) $\alpha=0.50, \beta=0.75$ e) $\alpha=0.50, \beta=0.75$

Figura 2.12. Mapeo de fluencias inelásticas de marcos de concreto reforzado no dúctiles con $Q \leq 4$ (Tena-Colunga y Nangullasmú-Hernández 2015)

A partir de los mapeos de fluencias inelásticas de las figuras 2.12 y 2.13, se demostró que para los modelos de concreto reforzado, existen combinaciones donde los parámetros de rigidez α y β lideran a que se desarrollen fluencias inelásticas importantes en las columnas exteriores de los entrepisos donde los disipadores desarrollan sus mayores ductilidades, sobre todo cuando se pretende desarrollar la ductilidad máxima posible de los disipadores μ , dando como consecuencia valores de Q de gran magnitud y en algunos casos siendo mucho mayores que los supuestos para el diseño. En este sentido se estudió si limitar el parámetro Q , a un valor menor al que en teoría puede desarrollar ($Q \leq 4$), mejora el comportamiento estructural global obteniendo como resultado que se concentren los valores máximos de ductilidades en los disipadores y algunas vigas, mientras que algunas columnas presentan fluencias inelásticas incipientes, a pesar de que los elementos del marco se diseñen y detallen como no dúctiles (figura 2.12).

Los resultados presentados para los marcos dúctiles de concreto reforzado contrastan en gran medida con los obtenidos para los marcos de acero dúctiles. Se aprecia de la figura 2.14 que un modelo de acero de 15 niveles diseñado con balances de rigidez de $\alpha=0.50$ y $\beta=0.25$ no presenta fluencias inelásticas en vigas y columnas, mientras que en los modelos de concreto con los mismos balances de rigidez exhiben potenciales pisos suaves (figura 2.13b). Esto se debe a que el procedimiento de diseño por capacidad seleccionado fue diferente para ambos casos; por ejemplo, en los marcos de concreto dúctiles se privilegió el diseño de los nudos del marco como totalmente confinados conforme lo recomiendan normas internacionales, y esto produjo que no se obtuvieran los desempeños estructurales deseados cuando se intenta diseñar al sistema a la máxima ductilidad objetivo de los disipadores (Tena y Gama 2017).

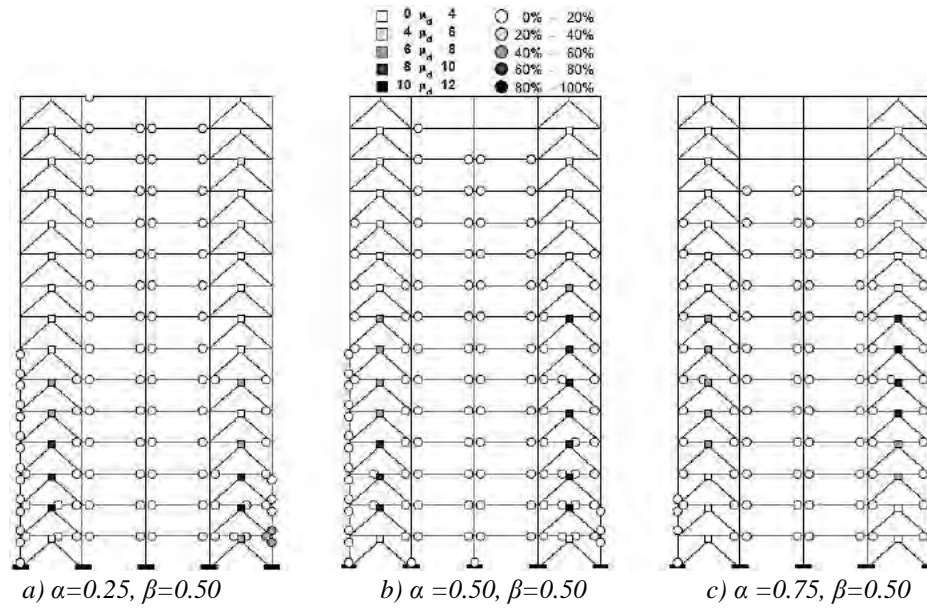


Figura 2.13. Mapeo de fluencias inelásticas para marcos de concreto reforzado dúctiles de 15 niveles (Tena y Gama 2017)

Se destaca del trabajo de Tena y Hernández el someter el modelo en estudio a un registro de aceleración sintético, compatible con el espectro al que fue diseñado, con el objetivo de comprobar la metodología de diseño ante sismos intensos. Para sus correspondientes espectros de respuesta se tomaron amortiguamientos viscosos equivalentes del 2% y 5%, con lo que superaban las ordenadas espectrales de diseño en 58.7% y 5.9% respectivamente. A pesar de que la demanda a la que iba a estar sometido el modelo era mayor a la que fue diseñado, se observa un comportamiento exitoso donde la no linealidad se concentra principalmente en los disipadores y con fluencias inelásticas incipientes de algunas vigas donde los disipadores desarrollan mayores ductilidades (figura 2.14b)

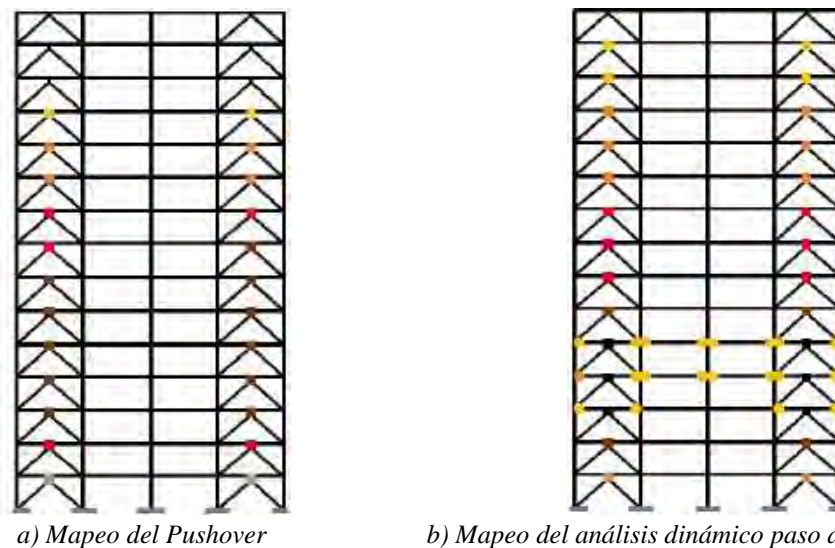


Figura 2.14. Mapeo de fluencias inelásticas para marcos de acero de 15 niveles (Tena y Hernández 2017)

Como se detalla en párrafos anteriores, las investigaciones aquí reportadas varían desde modelos de 1GDL con comportamiento elastoplástico, hasta sistemas de MGDL con pendientes posteriores a fluencia. Los análisis realizados por los investigadores antes mencionados (Jara *et al.* 2007, Jara 2009, Vargas y Bruneau 2009, Tena y Nangullasmú 2013, Tena y Hernández 2017, Tena y Gama 2017) son del tipo estático y dinámico no lineal desplantados en terreno firme y terreno blando. Aunque no se pueden comparar los resultados de todas las investigaciones de manera directa, debido a la variación de los parámetros empleados en cada una de ellas, el comportamiento observado del universo de modelos evaluados es bastante similar, por lo que se considera como un punto de partida enriquecedor para el tema de disipación de energía.

3. EVALUACIÓN DE MODELOS DE 1GDL CON DISIPADORES DE ENERGÍA

3.1 Introducción

De investigaciones anteriores a ésta (Nangulasmú 2011, Tena y Nangulasmú 2013), se ha comprobado que para marcos de concreto reforzado con elementos sin el detalle de confinamiento dúctil ($Q=2$), tiene como consecuencia la formación de articulaciones en columnas de los entrepisos donde los disipadores desarrollan su ductilidad máxima. Con el objetivo de mitigar el posible daño a columnas, asociado a la rotación plástica de éstas, se ha evaluado el impacto de utilizar requisitos mínimos de detallado dúctil en el procedimiento de diseño con modelos simples de 1GDL (figura 3.1). Estos modelos se diseñaron con un cortante basal del 10% del peso de una estructura representativa de 15 entrepisos. El fundamento de adicionar estos requisitos mínimos para detallado por confinamiento dúctil a los elementos de concreto, diseñados como elementos no dúctiles, tiene su base en la dificultad que exponen los ingenieros estructurales en México para construir y diseñar marcos dúctiles siguiendo todas las pautas expuestas en las normas del Distrito Federal del 2004 (Riobóo 1995, Tena-Colunga *et al.* 2008).

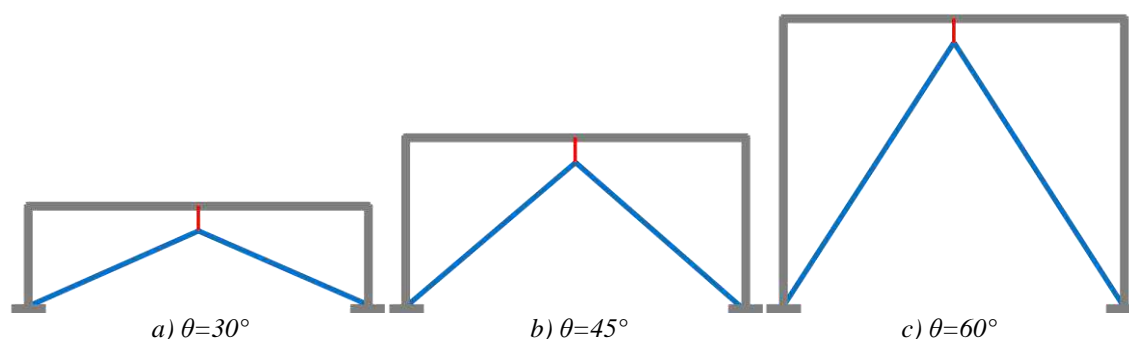


Figura 3.1. Representación esquemática de algunos sistemas de 1GDL considerados

Se evaluaron tres diferentes casos para las relaciones de rigidez entre el sistema del marco y el sistema contraviento-disipador; $\alpha=0.25$, el sistema del marco aporta menor rigidez lateral al sistema global; $\alpha=0.50$, el sistema del marco aporta la misma rigidez lateral al sistema global que el del sistema contraviento-disipador; y $\alpha=0.75$, el sistema del marco aporta mayor rigidez lateral al sistema global. Además, se propone un balance de rigidez elástica que deben tener los disipadores de energía que será de la mitad con respecto al de los contravientos de soporte ($\beta=0.50$), para que los disipadores alcancen su máxima capacidad de ductilidad. Finalmente, se evaluó el comportamiento del sistema global en función del ángulo de contraventeo utilizado, para lo cual dicho ángulo se modificó a los siguientes valores: $\theta=30^\circ$, 40° , 45° , 50° y 60° . Para cumplir con este parámetro, se cambió la altura de las columnas de los modelos en estudio (figura 3.1) y se mantuvo constante la longitud de la viga para todos los modelos evaluados en esta sección. Por último, la longitud de los disipadores de energía fue variable acorde a los requisitos de resistencia y de rigidez para cada modelo en particular.

3.2 Impacto del confinamiento en elementos de concreto reforzado

Se empleó el programa BIAx (Wallace y Moehle 1989) para el modelado de los diagramas momento-curvatura y de interacción de los elementos de concreto reforzado, los cuales servirán como datos de entrada para los análisis no lineales. Este programa permite el modelado de la sección transversal por medio de un mallado, propuesto por el usuario, permitiendo la consideración de curvas esfuerzo-deformación para concreto confinado y sin confinar. El programa tiene la opción de utilizar, entre otros, los modelos constitutivos para el concreto descritos por Kent y Park (1986), además de permitir el modelado del acero de refuerzo como una curva bilineal con consideraciones de efectos de endurecimiento por deformación; la cual se basa en evidencia experimental, y consta de una parte ascendente representada por una curva de segundo grado. El modelo supone que no se afecta a la deformación por esfuerzo máximo, pero sí provoca un aumento en su resistencia (Park y Paulay 1986). El parámetro que define la rama descendente en línea recta está representado por la letra “Z”, y se especifica por la deformación presente cuando el esfuerzo ha caído hasta $0.5f_c$. La ecuación que representa a esta variable está dada por:

$$Z = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - 0.003} \quad (3.1)$$

La variable ε_{50h} , proporciona la ductilidad adicional debida a los estribos, y relaciona el cociente de volúmenes entre el corazón de concreto confinado y el de los estribos utilizados.

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s_h}} \quad (3.2)$$

En la figura 3.2 están representadas tres curvas esfuerzo-deformación a distintos niveles de confinamiento. La curva con línea punteada representa una curva típica para un concreto sin confinar; la curva con línea discontinua representa a un elemento de concreto con separación de estribos a 15 cm; y la curva con línea continua representa un elemento de concreto con separación máxima de estribos a 8 cm. Como se aprecia de esta figura, el considerar una separación de estribos más estrecha aumenta substancialmente la capacidad de deformación última y, en menor medida, su resistencia a compresión.

En la figura 3.3 se comparan los diagramas momento-curvatura para una columna de concreto; ésta toma en cuenta el mismo armado longitudinal, pero con diferentes separaciones de estribos. De esta figura se observa que proveer a los elementos de concreto reforzado con las especificaciones mínimas de detallado dúctil, aumenta ligeramente su resistencia con respecto a la de un detallado no dúctil, pero incrementa notablemente su curvatura límite, siendo ésta el parámetro más característico. En consecuencia, su capacidad de rotación incrementa de tres a cuatro veces con respecto a la de un detallado transversal no dúctil, y se verá reflejada con mayor detalle en la comparación de mapeos de fluencia que se exponen y discuten en secciones posteriores.

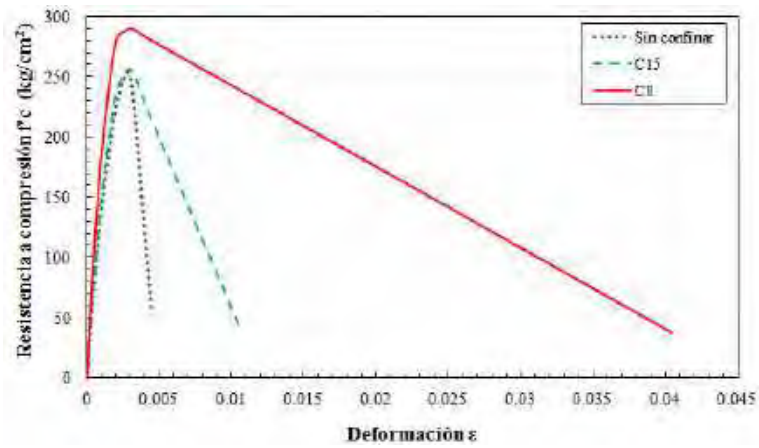


Figura 3.2. Curva esfuerzo-deformación para concreto confinado por estribos rectangulares

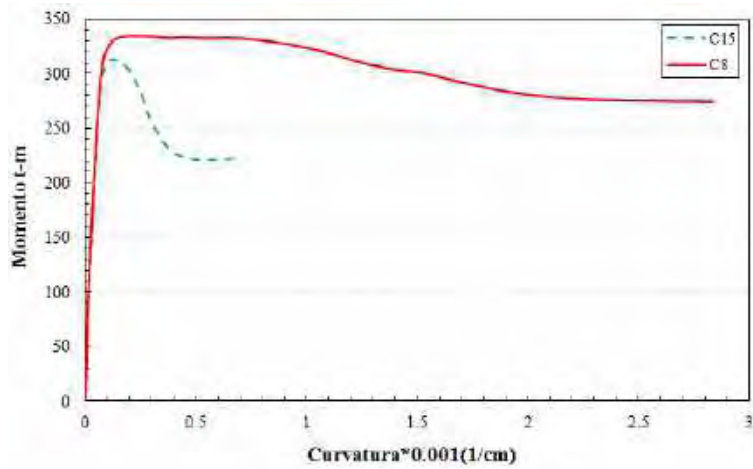


Figura 3.3. Diagrama momento-curvatura para columnas con distinta separación de estribos

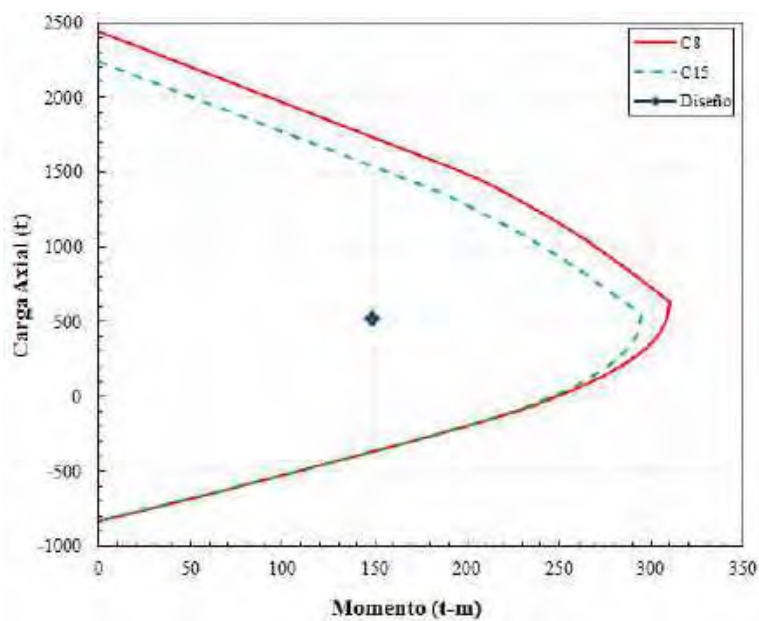


Figura 3.4. Diagrama momento- carga axial para distintas separaciones de estribos

Para las columnas, además del diagrama momento-curvatura, también se obtuvieron los diagramas de interacción momento – carga axial. En la figura 3.4 se presentan diagramas momento – carga axial para distintas separaciones de estribos, acorde al detallado para confinamiento dúctil (línea continua) y detallado no dúctil (línea discontinua). De ésta se observa que la capacidad de resistencia del elemento aumenta conforme se hace más estrecha la separación de los estribos. En otras palabras, se observa un aumento en la capacidad a compresión en ausencia de momento y el aumento de la magnitud en el punto de la falla balanceada cuando se utilizan parámetros de confinamiento dúctil.

El objetivo principal de adicionar requisitos mínimos de confinamiento dúctil a los marcos de concreto con disipadores de energía por histéresis del material, es analizar si esto es suficiente para disminuir las magnitudes de rotación, representadas por una escala de colores (figura 2.12), que a su vez está asociada al daño moderado en vigas y columnas para marcos de concreto reforzado con detallado no dúctil y disipadores de energía (Nangullasmú 2011, Tena y Nangullasmú 2013, Tena-Colunga y Nangullasmú-Hernández 2015). Es importante recalcar que para que este sistema estructural sea eficiente y aporte un beneficio adicional sobre un sistema estructural convencional, el daño se debe focalizar exclusivamente en los disipadores de energía, y que los elementos del marco deben permanecer prácticamente elásticos o con una no linealidad incipiente durante todo el evento sísmico.

3.3 Resultados de análisis estáticos no lineales para modelos de 1GDL

Se realizaron análisis estáticos no lineales a los modelos de 1GDL aplicando una carga lateral incremental y se detuvo el análisis cuando los disipadores de energía alcanzaban una ductilidad de $\mu=12$, suponiendo que a dicha magnitud el dispositivo se desconectaba del contraviento de soporte. Con el objetivo de evaluar el comportamiento global de los modelos, se graficaron las curvas de cortante basal normalizado – distorsión, separando la contribución de cada sistema involucrado en una gráfica diferente (figura 3.5); de éstas se aprecia con línea continua los modelos diseñados con un detallado transversal dúctil y con línea discontinua los modelos con detallado no dúctil. En primera instancia, se observa que el usar diferente tipo de detallado para los elementos del marco no afecta en la magnitud de distorsión desarrollada para los modelos en estudio; esto se debe a que en el proceso de diseño el único elemento que alcanza su estado último es el disipador (fusible estructural) y, por ende, la distorsión última que alcanza el sistema global es la misma sin importar el tipo de detallado utilizado (figura 3.5). Además, se aprecian diferencias en la magnitud de cortante basal desarrollados por el sistema global comparando los dos tipos de detallados evaluados.

De manera general se aprecia que el usar un confinamiento dúctil incrementa en promedio 12% el cortante que desarrollan los modelos. Este incremento en la resistencia se aprecia de mejor manera cuando se evalúan el sistema del marco y el del contraviento-disipador por separado, donde se observa que éste último no sufre cambios en la distorsión máxima que desarrolla para todos los modelos en cuestión (figura 3.5).

Si se evalúa la contribución del sistema del marco con cualquier balance de rigidez α (figura 3.5), no existen diferencias en la magnitud de distorsión desarrollada en el último paso de carga comparando los dos tipo de detallados utilizados. Sin embargo, se observa que cuando se utiliza un detallado no dúctil, los elementos del marco empiezan a fluir antes que cuando se usa un detallado dúctil. Asimismo, se aprecia que conforme la magnitud del parámetro α se incrementa, el aporte de rigidez y de resistencia del sistema del marco se incrementa también; asimismo, un incremento en el aporte de rigidez trae consigo un incremento en la distorsión última desarrollada por el sistema del marco, la cual incluirá un incremento en la magnitud de rotación para vigas y columnas como se comentará con detalle más adelante.

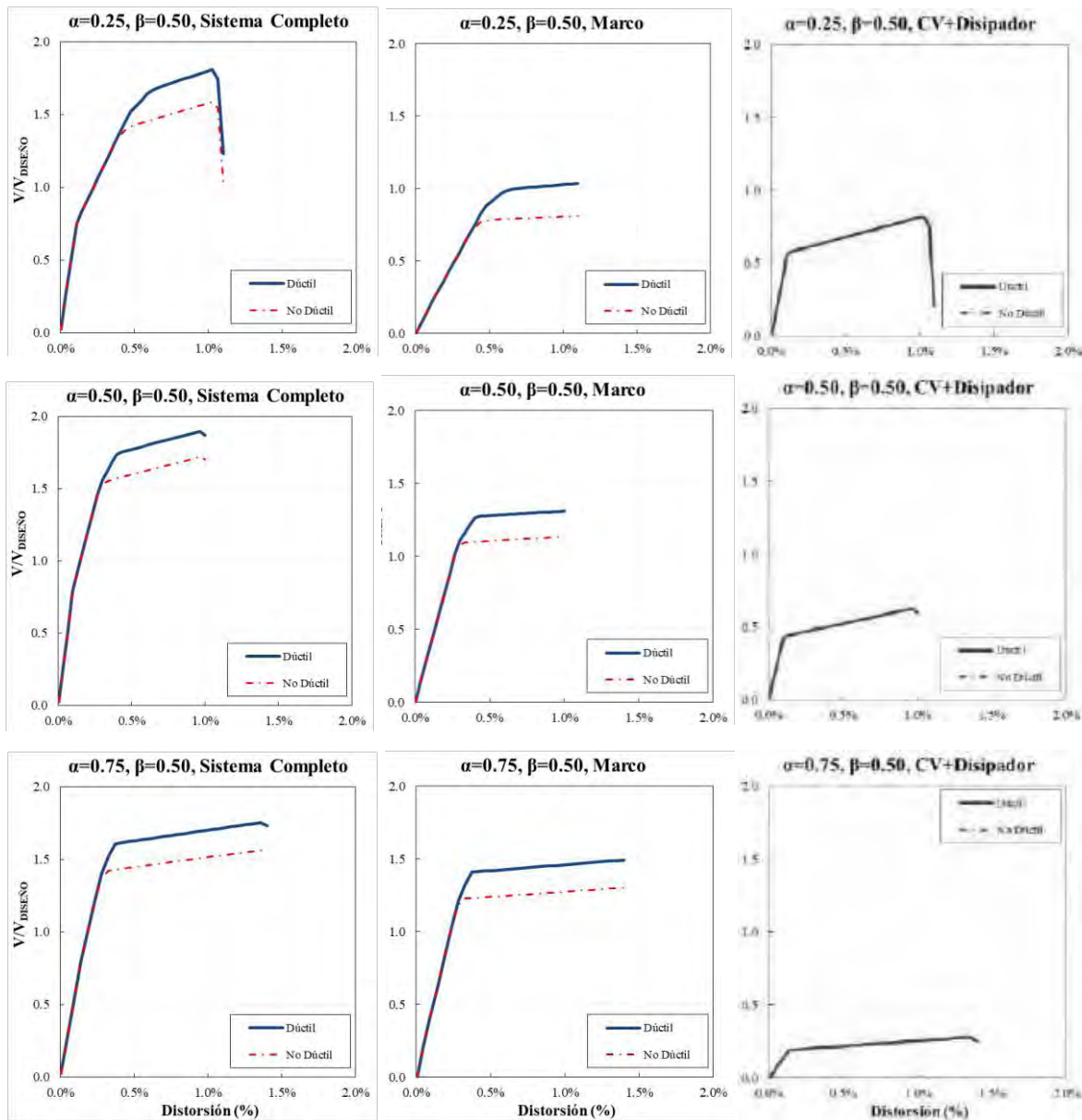


Figura 3.5. Curva de cortante basal normalizado – distorsión, modelos de 1GDL y $\theta=45^\circ$

Independientemente del balance de rigidez que tomará cada uno de los sistemas involucrados, se busca que el único elemento que desarrolle su capacidad última es el disipador de energía, por eso se aprecia de la figura 3.5, que el sistema contraviento-disipador es el que fluye primero en todos los casos. Para ello, es importante que el contraviento de soporte permanezca elástico durante todo el proceso de incremento de carga lateral. Por otra parte, se tiene que garantizar que los elementos del marco no sufran daño significativo que pueda repercutir en un proyecto de reparación mayor, debido a que no se estaría cumpliendo la filosofía de diseño para estructuras con dispositivos de control de la respuesta sísmica. Para esto se tiene que garantizar que vigas y columnas toleren la magnitud de rotación que se presentan como consecuencia de que el elemento disipador desarrolle su capacidad última; y de las gráficas de la figura 3.5 se aprecia que los elementos del marco no fallan pero conforme se incrementa el valor de α su participación no lineal será mayor.

Al evaluar la contribución del sistema contraviento – disipador con cualquier balance α , no existen diferencias ni en la distorsión última ni en la resistencia que se desarrolla, dado que el parámetro evaluado afecta directamente al sistema del marco. Las diferencias principales se observan cuando se evalúan los mapeos de fluencia para los sistemas de 1GDL, y se aprecia de éstas que cuando se usa un detallado no dúctil lidera a magnitudes de rotaciones más grandes, que podrían asociarse a un daño mayor a los componentes del marco cuando el disipador alcanza su ductilidad máxima (figura 3.7a y figura 3.8a).

Los mapeos de fluencia inelástica, representados en las figuras 3.7 y 3.8, presentan un código de colores que simbolizan la magnitud de rotación a flexión para vigas y columnas (figura 3.6a) y la ductilidad local de los disipadores de energía (figura 3.6b). En la figura 3.6a se presenta de manera ilustrativa la escala de colores asignada para los elementos de concreto, ésta se subdivide en cinco colores diferentes para representar el porcentaje de no linealidad que desarrollan los elementos del marco; es decir, cada color tiene un intervalo de porcentajes obtenida con la siguiente ecuación:

$$\theta(\%) = \frac{\theta - \theta_y}{\theta_u - \theta_y} \quad (3.1)$$

donde:

θ : rotación acumulada del elemento en el último paso de carga del análisis no lineal

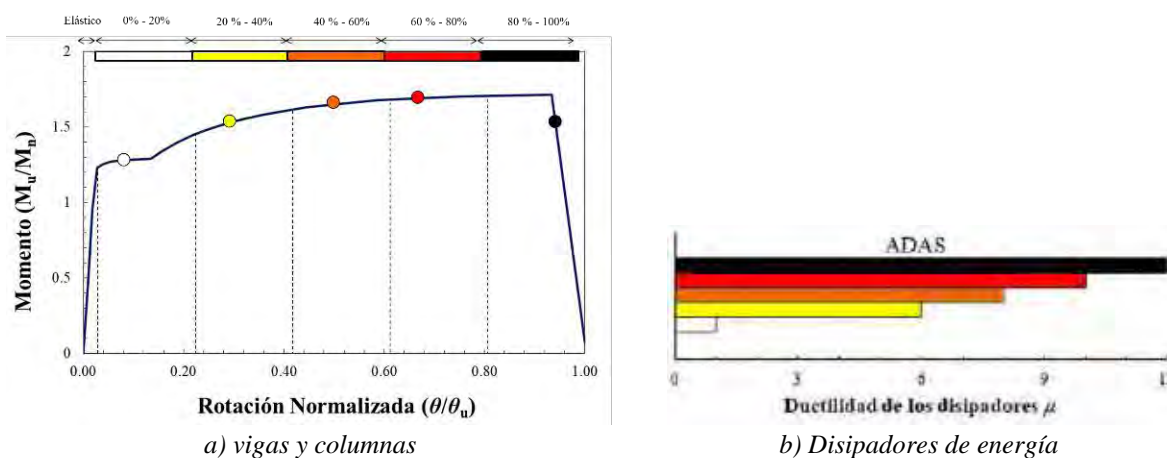
θ_y : rotación de fluencia

θ_u : rotación última que el elemento es capaz de desarrollar

$\theta(\%)$: relación de rotación plástica del elemento y su ductilidad local en términos de porcentaje

Por lo tanto, el punto en color blanco, representa un punto a partir del cual el elemento empieza a incursionar en el intervalo inelástico; un punto en color negro, representa una rotación cercana a la última que el elemento de concreto reforzado es capaz de soportar; y

los puntos amarillo, naranja y rojo, son puntos intermedios entre el punto de fluencia y el punto último que soporta la sección. Para los disipadores de energía se utilizaron cuatro códigos de colores para la representación de su comportamiento no lineal (figura 3.6b), asignando el color negro para cuando los disipadores desarrollaban su ductilidad máxima ($10 \leq \mu \leq 12$). Para todos los casos (vigas, columnas y disipadores), no se colocó ninguna representación gráfica cuando el elemento se comportaba de manera elástica; lo cual, fue el caso para los contravientos de soporte con cualquier balance de rigidez utilizado.



a) vigas y columnas
b) Disipadores de energía
Figura 3.6. Escala de colores para el mapeo de fluencias inelásticas

Evaluando los mapeos de fluencia inelástica con la escala de colores de la figura 3.6, se observa que el usar los requisitos de detallado dúctil impactan en mayor medida a las columnas, que son los principales elementos que se busca mitigar su participación no lineal. Como era de esperarse, cuando se diseña al sistema del marco como no dúctil, se lidera a magnitudes de rotaciones mayores, las cuales se van incrementando conforme el valor de α incrementa también y se aprecia con cambios en el código de colores de la figura 3.7. Se observa de dicha figura que a pesar que para el balance $\alpha=0.25$, que es cuando el sistema del marco aporta menor rigidez al sistema global, magnitudes de rotación para vigas y columnas entre el 40% y 60% de la capacidad última de los elementos, lo que puede originar daños severos en éstos (figura 3.7a). El caso más crítico se aprecia para cuando se usa un balance $\alpha=0.75$, donde la magnitud de rotación para la base de las columnas se encuentra muy cercana a la rotación última (figura 3.7c).

Cuando se usan los requisitos mínimos de detallado dúctil para vigas y columnas, se aprecia que el código de colores representan no linealidad incipiente en la base de las columnas y que la magnitud de rotación de las vigas se incrementa conforme el valor de α incrementa también (figura 3.8). Observando el mapeo de fluencia inelástica de la figura 3.8c, se aprecia que ésta es la que desarrolla valores de rotación mayores con respecto al de los otros balances evaluados, y que son menores al 40% de la capacidad última del elemento, a pesar que el daño esperado sería moderado para vigas principalmente, se espera que dicho valor de rotación disminuya para los modelos de MGD L cuando haya una mejor distribución de la no linealidad al tener más elementos estructurales.

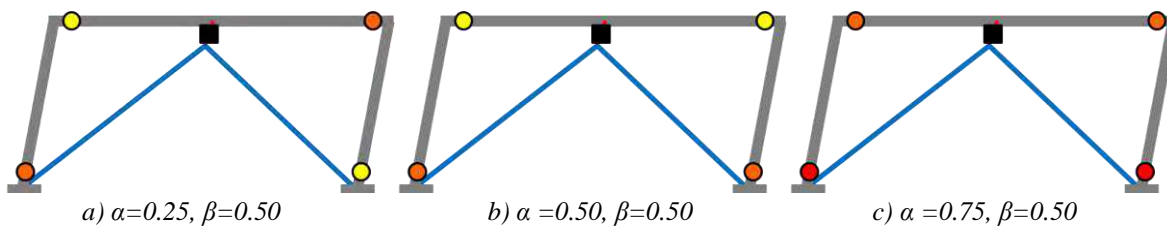


Figura 3.7. Mapeos de fluencias inelásticas para modelos de 1GDL, $\beta=0.50$, detallado NO dúctil

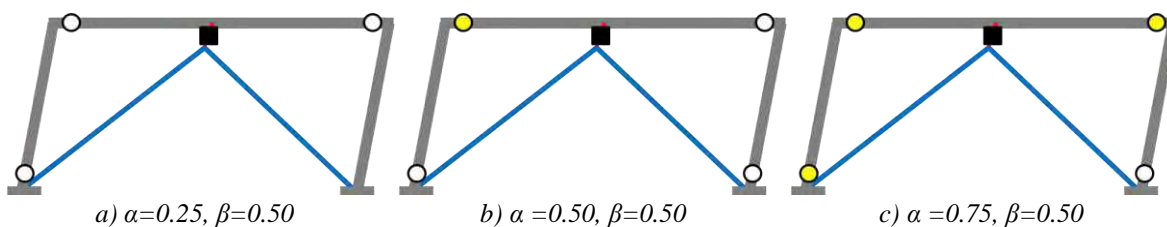
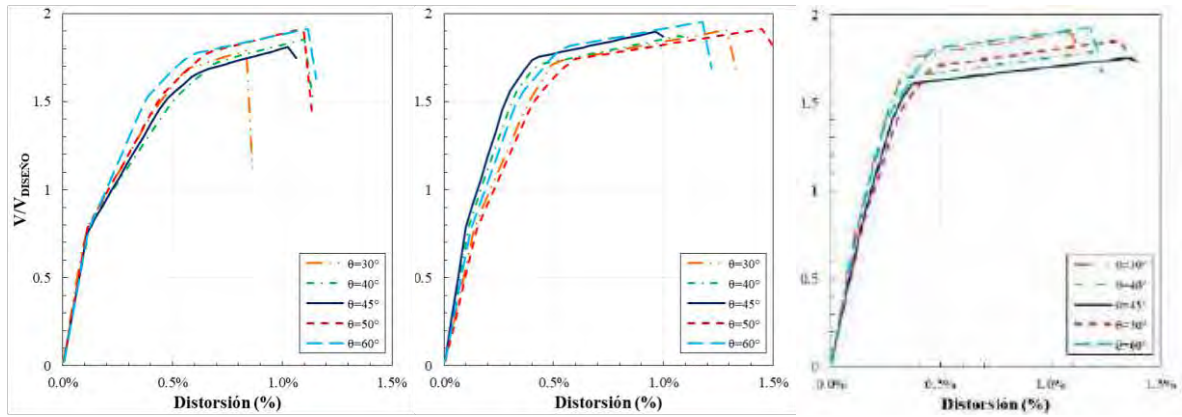


Figura 3.8. Mapeos de fluencias inelásticas para modelos de 1GDL, $\beta=0.50$, detallado dúctil

En las figuras 3.9 y 3.10 se comparan las distintas curvas de cortante basal normalizado – distorsión del sistema global con los distintos balances α evaluados, así como los distintos ángulos entre el contraviento y la horizontal proyectada. Se aprecia de éstas que, para la mayoría de los casos, usar un ángulo de contravientos igual a $\theta=50^\circ$ desarrolla mayor nivel de distorsión en comparación a los otros ángulos de contraventeo evaluados. Para los casos donde se usó $\alpha=0.25$ (figuras 3.9a y 3.10a), se observa que el disipador alcanza su ductilidad última a menores valores de distorsión global, y que el modelo cuando se tiene un ángulo de $\theta=30^\circ$ es el que desarrolla menor distorsión de todos los modelos evaluados. Cuando se usan requisitos de detallado dúctil, los modelos que más cortante desarrollan son cuando tienen un ángulo de $\theta=60^\circ$ (figura 3.9); cuando se diseñan a vigas y columnas como no dúctiles no se presenta una tendencia significativa como en el caso anterior, aunque se destaca que cuando se usa $\alpha=0.50$ y $\theta=45^\circ$ se presenta el modelo que desarrolla más cortante pero menor distorsión global (figura 3.10b). De manera general, se distingue que independientemente de las diferencias entre usar o no requisitos de detallado dúctil, los valores de distorsión son menores al 1.5% para los modelos de 1GDL y el valor normalizado del cortante se encuentran entre 2.0 y 1.5, obteniendo mayores valores para cuando se usan los requisitos mínimos de detallado dúctil.

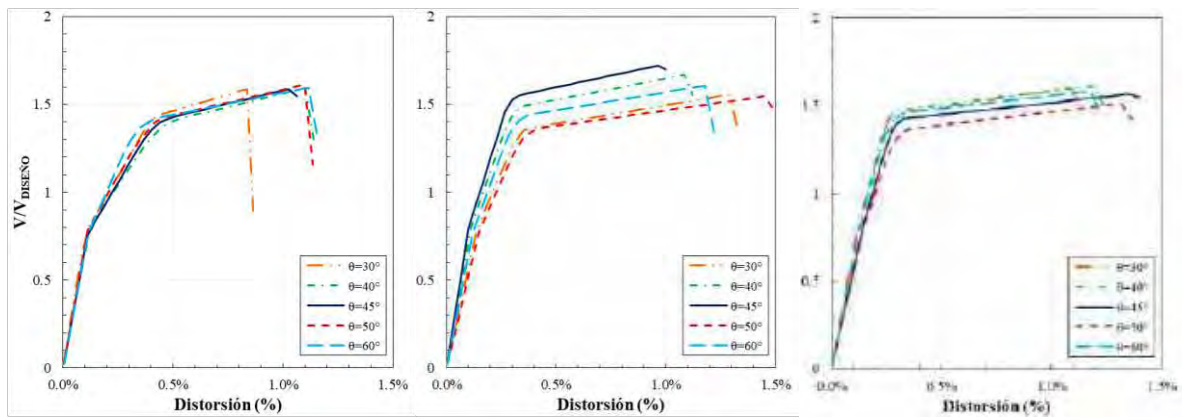


a) $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$

b) $\alpha=0.50$, $\beta=0.50$

c) $\alpha=0.75$, $\beta=0.50$

Figura 3.9. Curva de cortante basal normalizado – distorsión, modelos de 1GDL, confinamiento dúctil



a) $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$

b) $\alpha=0.50$, $\beta=0.50$

c) $\alpha=0.75$, $\beta=0.50$

Figura 3.10. Curva de cortante basal normalizado – distorsión, modelos de 1GDL, confinamiento NO dúctil

En la figura 3.11 están graficadas todas las curvas cortante basal – distorsión para todos los modelos con confinamiento dúctil y balance $\beta=0.50$. De manera ilustrativa se acomodaron las gráficas de izquierda a derecha aumentando el valor de α (aportación del marco al sistema global); y de arriba hacia abajo, aumentando el ángulo de la posición de los contravientos con respecto a la horizontal (θ). Para cada gráfica se tienen tres curvas que representan el comportamiento del sistema global (línea continua), el comportamiento del sistema del marco (línea discontinua verde) y el comportamiento del sistema contraviento – disipador (línea discontinua naranja).

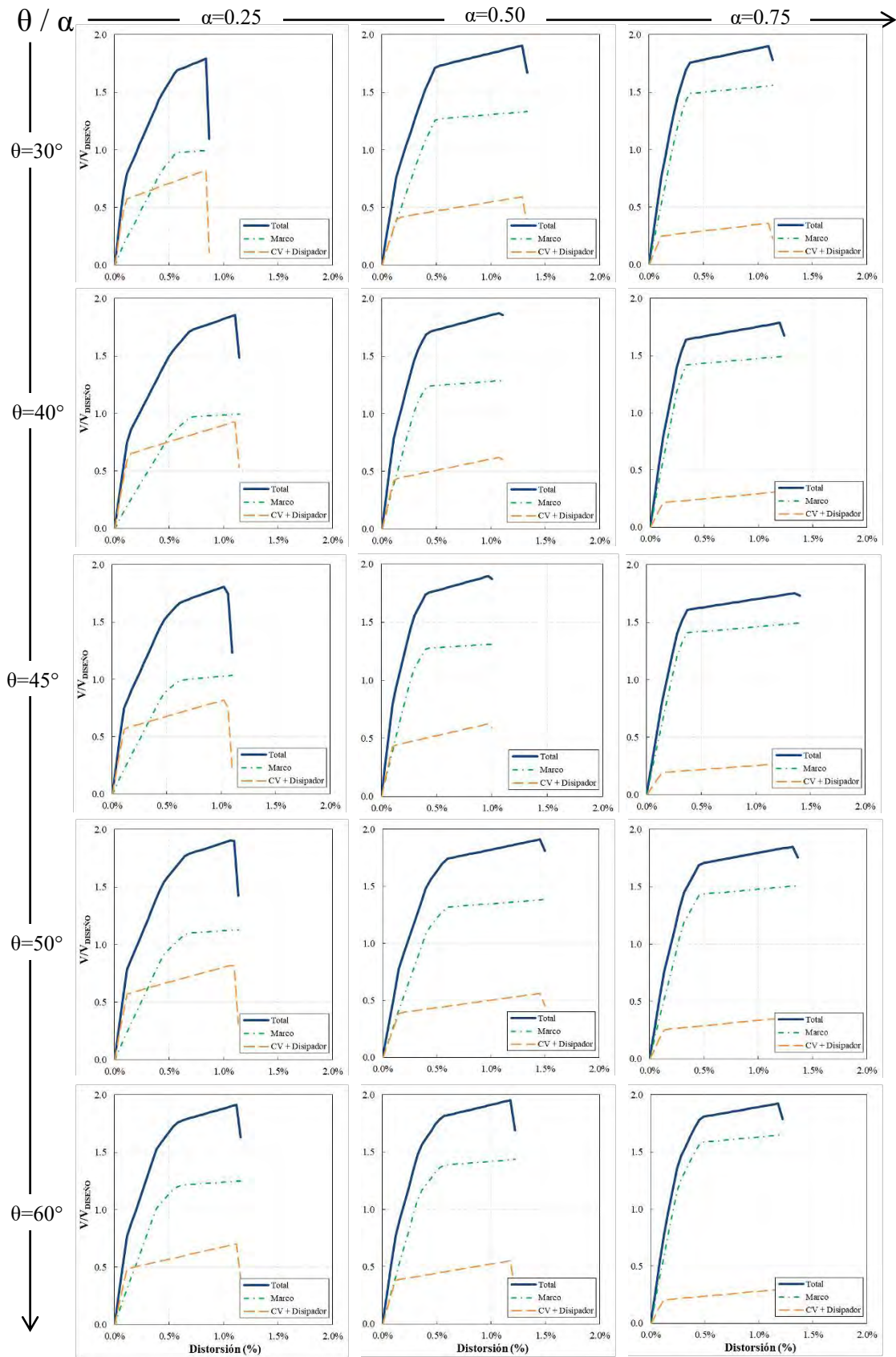


Figura 3.11. Curva de cortante basal normalizado – distorsión, modelos de IGDL, confinamiento dúctil

De manera general se observa en todos los modelos, que la primera fluencia se presenta en los disipadores de energía sin importar el balance de rigidez utilizado. Además, se aprecia que conforme el valor de α incrementa, la contribución de rigidez y de resistencia del sistema del marco al sistema global es mayor. Asimismo, mientras el valor de θ incrementa la magnitud del cortante basal que desarrolla, el sistema global se incrementa también. Finalmente, se observa que el ángulo de contravientos que fomenta a desarrollar mayores niveles de deformación se encuentra entre $50^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ para $\alpha=0.25$; $\theta = 50^\circ$ para $\alpha = 0.50$, y $\theta = 45^\circ$ para $\alpha = 0.75$ (figura 3.10).

De las curvas de cortante basal normalizado – distorsión, se hizo una idealización bilineal con el objetivo de obtener parámetros asociados a niveles de ductilidad global y de sobrerresistencia que los modelos de 1GDL fueron capaces de desarrollar. La idealización propuesta se realizó usando el concepto de energía de deformación y para ello se igualaron las áreas bajo las curvas para obtener el desplazamiento de fluencia del sistema global. De manera esquemática se presenta en la figura 3.12 un ejemplo de la idealización comentada, donde se observa la curva trilineal obtenida de los análisis estáticos no lineales y la curva bilineal como una idealización de esta última. A partir de dicha idealización bilineal, se obtuvieron parámetros de comportamiento sísmico asociado a la ductilidad (Q) y a la sobrerresistencia (R); la primera, representa la capacidad de deformación inelástica de una estructura y se obtiene del cociente entre el desplazamiento último y el desplazamiento de fluencia idealizado; el valor de R , está asociado a las reservas de resistencia como consecuencia de la amplificación de carga y de la reducción de resistencia del proceso de diseño estructural (principalmente), y se obtiene del cociente del cortante último que desarrolla el sistema y el cortante basal de diseño.

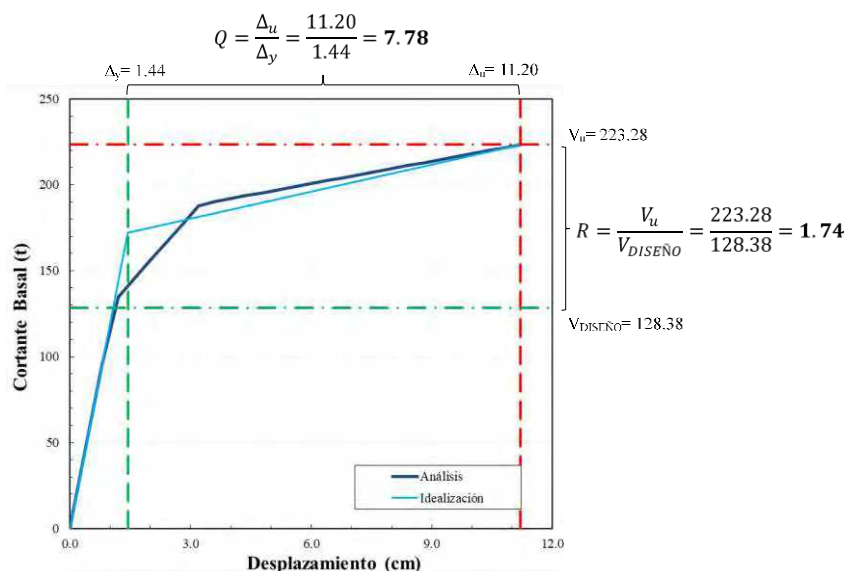


Figura 3.12. Idealización bilineal de la curva de cortante basal– desplazamiento

En la figura 3.13 se presentan los valores de la ductilidad global (Q) que desarrollan los modelos de 1GDL evaluados. Como se aprecia de las curvas de cortante basal normalizado – distorsión, el uso de confinamiento dúctil o no dúctil presenta diferencias en el cálculo de los valores de Q y R por lo que se a continuación se muestran los valores obtenidos con cada tipo de confinamiento. De esta figura se representan con diferentes formas los valores de α utilizado y para diferenciar el tipo de confinamiento se colocó el mismo color del contorno de la figura al relleno de éstas para los modelos con confinamiento dúctil (figura 3.13).

Se aprecia de manera general que cuando se utiliza un confinamiento dúctil (CD), la ductilidad global que desarrolla el sistema global disminuye para cualquier balance α usado cuando se limita la ductilidad máxima del dissipador a $\mu=12$. Además, conforme el sistema del marco aporta mayor rigidez al sistema global, el valor de Q tiende a disminuir. Los valores máximos desarrollados en los modelos de 1GDL tienden a cambiar en función del ángulo de contravento y del balance de rigidez α ; es decir, dichos valores se obtienen cuando $\alpha=0.25$ y $\theta=40^\circ$, $\alpha=0.50$ y $\theta=50^\circ$ y $\alpha=0.75$ y $\theta=45^\circ$. Aunque los valores obtenidos tienden a estar entre $4.5 \leq Q \leq 6.5$, éstos son poco prácticos para proponer como parámetro sísmico para reducción del espectro de diseño. La razón principal que dichos valores sean de esa magnitud se debe a que la distribución de la no linealidad se presenta en pocos elementos estructurales (seis elementos) y están asociados a tolerar daño incipiente en vigas cuando se emplea confinamiento dúctil (figura 3.8) y daño estructural importante en vigas y columnas cuando el detallado no es dúctil (figura 3.7), por lo que en el próximo capítulo se evalúa el comportamiento no lineal de modelos de múltiples grados de libertad y con esto obtener valores de Q más acordes a lo que se usa en códigos de diseño y se obtengan, además, mecanismos últimos de diseño más acordes con objetivos de diseño sísmico resiliente.

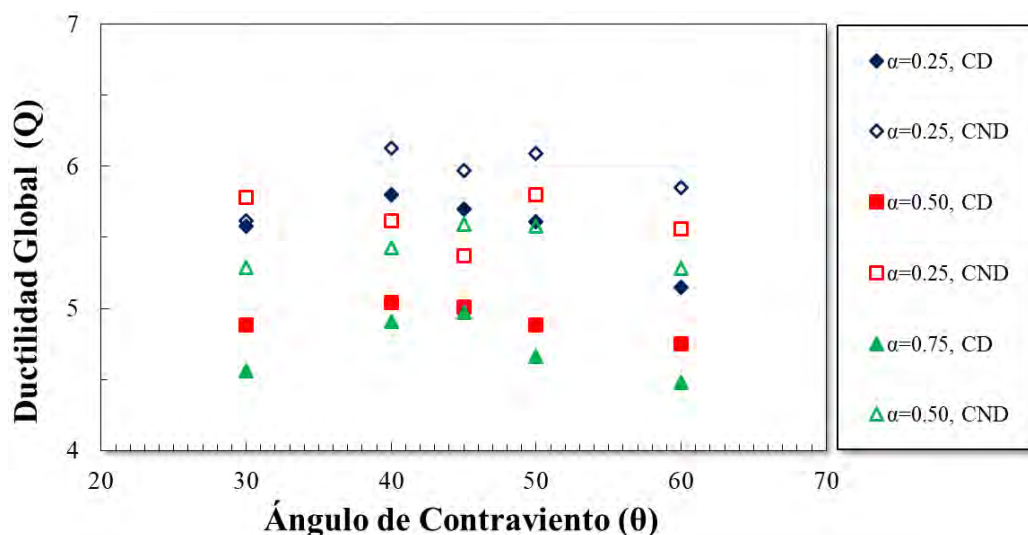


Figura 3.13. Ductilidad Global de los modelos de 1GDL

Finalmente, se evalúan los valores de sobrerresistencia desarrollados por los modelos de 1GDL, y de manera general se observa que el valor de R tiende a 1.5 cuando se usa un confinamiento no dúctil y este valor se incrementa a 2.0 cuando se usan los requisitos mínimos de detallado dúctil (figura 3.13). Por otra parte, los valores máximo de R se obtienen cuando se usa un valor de $\alpha=0.50$ con confinamiento dúctil (figura 3.13).

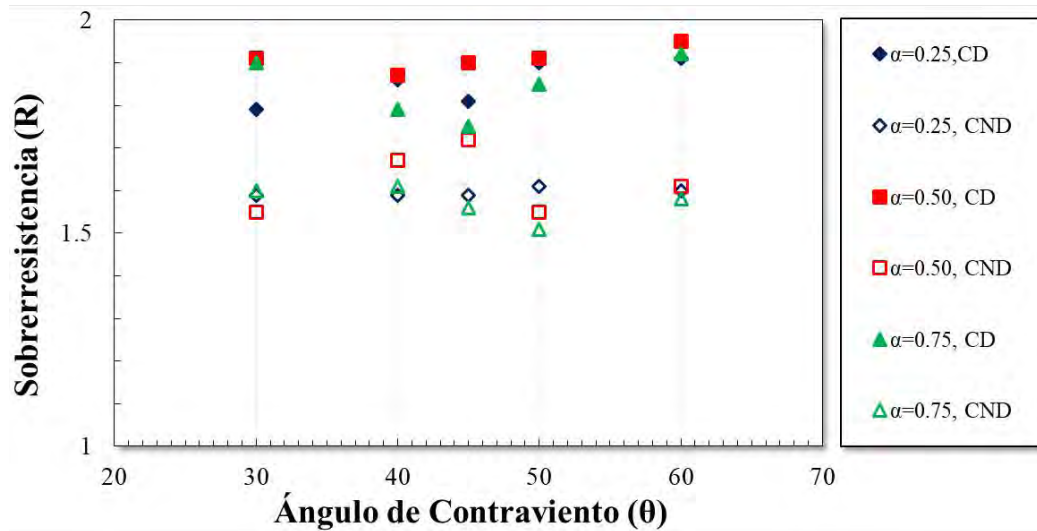


Figura 3.14. Parámetro de Sobrerresistencia de los modelos de 1GDL

El uso de los requisitos mínimos para detallado dúctil impacta significativamente en los cambios del código de colores para los mapeos de fluencia inelástica de los modelos en estudio, que son una representación gráfica del posible daño que se pueden presentar en los elementos estructurales. Como era de esperarse, existe un incremento en la resistencia que desarrollarán los elementos adicionando este requisito de diseño pero la capacidad de deformación se verá ampliamente mejorada con algunas fluencias incipientes. Por este motivo, en el siguiente capítulo se evalúa el uso de esta adición al procedimiento de diseño para mitigar la participación no lineal en los elementos del sistema del marco en modelos de marcos planos con diferentes números de entrepisos, con la finalidad de obtener mecanismos de diseño sísmico resilientes.

4. EVALUACIÓN DE DETALLADO DÚCTIL MÍNIMO PARA MARCOS CON DISIPADORES HISTERÉTICOS DE ENERGÍA

4.1 Introducción

Después de verificar la eficacia de adicionar requisitos mínimos de detallado dúctil en modelos de 1GDL, se analizaron marcos planos de concreto reforzado, con contraviento de acero en configuración chevrón que servirá de soporte a los dispositivos disipadores de energía por histéresis del material. La distribución de los elementos para los modelos en estudio, corresponde a edificios regulares formados por crujeías de 8 m de claro, con alturas de entrepiso de 4 m y ángulo de inclinación de los contravientos con respecto al plano horizontal de $\theta = 45^\circ$. Además, se variaron el número de niveles de los marcos en múltiplos de cinco, siendo el modelo más esbelto de 25 niveles. En la figura 4.1 se ilustra con colores y de manera esquemática, los cambios de secciones transversales tipo conforme a la altura (usanza común en la práctica ingenieril mexicana). Se observa también de ésta, que no coinciden cambios de secciones transversales del marco con los de contravientos en un mismo nivel para ninguno de los modelos analizados, con el objetivo de mitigar la posible formación de pisos débiles por cambios abruptos de rigidez que se pudieran presentar por dicho efecto.

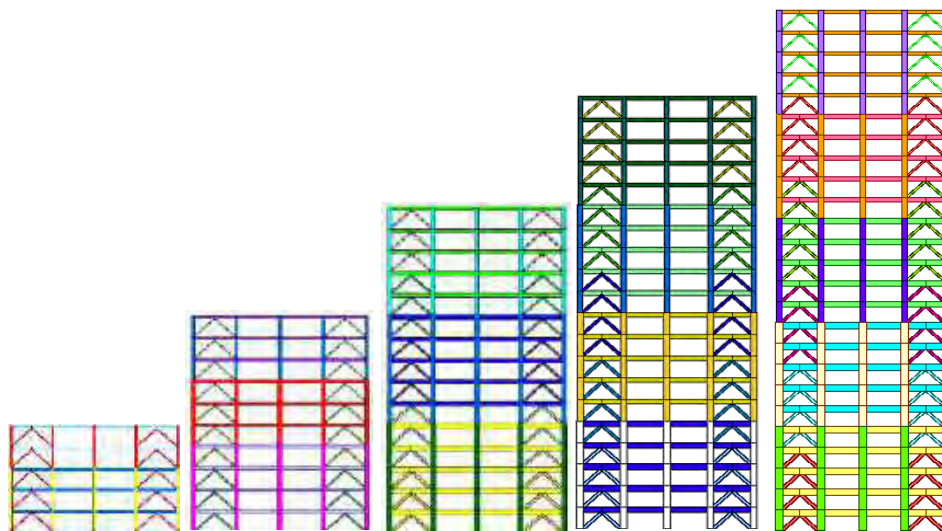


Figura 4.1. Representación de cambios de secciones transversales para los modelos estudiados

El método evaluado en el presente trabajo toma balances de rigidez entre el sistema marco y contraviento-disipador (α) y balances de rigidez entre el contraviento y el disipador (β), acorde a la metodología propuesta en trabajos previos (Nangullasmú 2011, Tena y Nangullasmú 2013, Tena-Colunga y Nangullasmú-Hernández 2015). Se evaluaron tres casos de balance de rigidez entre los sistemas estructurales marco y contraviento-disipador “ α ” (mismos valores que para los modelos de 1GDL):

- a) $\alpha=0.25$, el sistema del marco aporta menor rigidez lateral al sistema global
- b) $\alpha=0.50$, el sistema del marco aporta la misma rigidez lateral al sistema global que el del sistema contraviento-disipador
- c) $\alpha=0.75$, el sistema del marco aporta mayor rigidez lateral al sistema global.

Además, se proponen dos balances de rigidez elástica que deben tener los disipadores de energía con respecto a los contravientos de soporte, para que los disipadores alcancen su máxima capacidad de ductilidad ($\beta=1.0$, el contraviento es igual de rígido que el disipador y $\beta=0.50$, el disipador es la mitad de rígido que el contraviento).

Para todos los modelos evaluados, se definió un cortante sísmico de diseño común del 10% del peso total de la estructura ($V/W=0.10$). La metodología de prediseño, basada en los balances de rigidez antes descritos, se expone con mayor detalle en Nangullasmú (2011). En la tabla 4.1 se presentan las rigideces laterales de cada uno de los sistemas involucrados para el modelo de 20 niveles. Los cambios de colores en las columnas distinguen las variaciones de las secciones transversales conforme a la altura del modelo estudiado.

Tabla 4.1. Rigideces laterales del modelo 20N, $\alpha=0.50$, $\beta=0.50$ (unidades: t/m)

Nivel	K_{marco}	K_{cv}	$K_{\text{disipador}}$	$K_{\text{cv-disipador}}$	α
1	127,513.44	271,788.64	135,894.32	51,769.43	0.71
2	57,903.63	271,788.64	135,894.32	51,769.43	0.53
3	57,903.63	271,788.64	135,894.32	51,769.43	0.53
4	57,903.63	271,788.64	135,894.32	51,769.43	0.53
5	57,903.63	196,429.06	98,214.53	37,415.22	0.61
6	46,153.21	196,429.06	98,214.53	37,415.22	0.55
7	39,144.57	196,429.06	98,214.53	37,415.22	0.51
8	39,144.57	196,429.06	98,214.53	37,415.22	0.51
9	39,144.57	129,063.27	64,531.63	24,583.64	0.61
10	39,144.57	129,063.27	64,531.63	24,583.64	0.61
11	29,915.39	129,063.27	64,531.63	24,583.64	0.55
12	25,751.57	129,063.27	64,531.63	24,583.64	0.51
13	25,751.57	115,110.48	57,555.24	21,925.97	0.54
14	25,751.57	115,110.48	57,555.24	21,925.97	0.54
15	25,751.57	115,110.48	57,555.24	21,925.97	0.54
16	16,777.17	115,110.48	57,555.24	21,925.97	0.43
17	12,928.90	60,462.07	30,231.04	11,516.75	0.53
18	12,928.90	60,462.07	30,231.04	11,516.75	0.53
19	12,928.90	60,462.07	30,231.04	11,516.75	0.53
20	12,928.90	60,462.07	30,231.04	11,516.75	0.53

Además de tomar en cuenta que los balances de rigidez lateral entre los sistemas cumplieran con los parámetros propuestos inicialmente en la metodología de prediseño, se revisaron que los elementos estructurales cumplieran con los requisitos de resistencia que las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal del 2004 especifican en cada uno de sus apartados para cada material involucrado (acero para contravientos y concreto para elementos del marco). Con base en esto, los contravientos se revisaron para que su relación de esbeltez no excediera el máximo permitido por la norma (NTCEM-04, Ap. 6.2.3.2), y que su resistencia de diseño estuviera dentro de los estados límites pertinentes (NTCEM-04, Ap. 3.2.2). Como la filosofía de diseño de este sistema estructural es que se desarrolle principalmente la no linealidad del sistema global en los disipadores de energía, se prevé que los contravientos permanezcan elásticos durante todo el evento sísmico, con la finalidad de evitar que los contravientos se dañen y los disipadores se desprendan antes que alcancen su ductilidad objetivo. Para asegurar esta premisa, se utilizó un factor de seguridad de 1.5 en la revisión por resistencia para los contravientos, según recomendaciones del Ing. Enrique Martínez Romero (Martínez 1994).

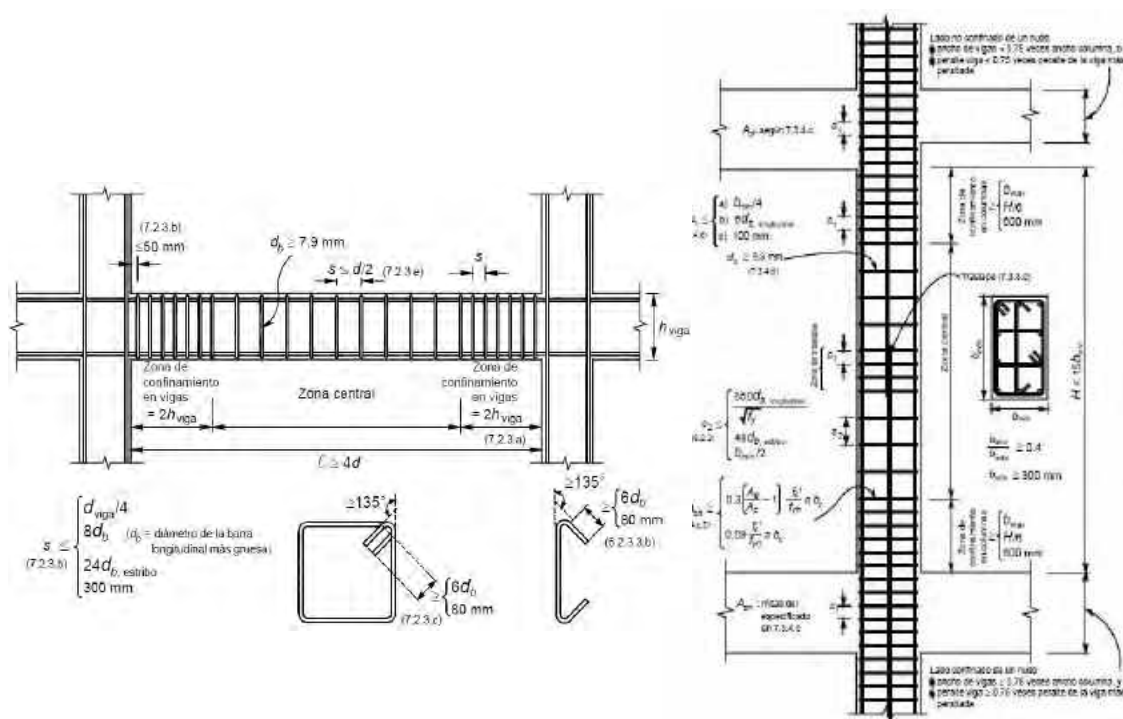


Figura 4.2. Detallado de elementos para marcos dúctiles (NTCC-04 2004)

Los elementos del marco se diseñaron conforme a lo establecido en las secciones 6.1 y 6.2 (NTCC-04 2004), correspondientes al diseño de vigas y columnas de concreto reforzado no dúctiles, y se complementaron los requisitos antes mencionados con recomendaciones mínimas para detallado por confinamiento dúctil. En la sección 7.2.3 (figura 4.2), se especifica la separación mínima por confinamiento para elementos a flexión (vigas), mientras que en la sección 7.3.4 se establece la separación mínima de estribos por confinamiento de elementos sometidos a flexocompresión (columnas), de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del 2004 (NTCC-04 2004).

4.2 Diferencias en el diseño del refuerzo por confinamiento transversal

A continuación, se detallan las diferencias obtenidas del diseño de elementos de concreto reforzado usando los requisitos mínimos de confinamiento dúctil y sin el uso de estos requisitos. Se aclara que para esta comparativa, el refuerzo longitudinal no presentó diferencia alguna, dado que los requisitos adicionales usados en dicho procedimiento se enfocan en el diámetro, número de ramas y separación de los estribos utilizados.

Los requisitos de refuerzo mínimo para marcos no dúctiles detallan que el diámetro a utilizarse en estribos no debe ser menor que el número 2.5 (Ap. 2.5.2.2 NTCC-04); y dado que las fuerzas cortantes para el diseño de los elementos del marco se reparten acorde al balance de rigidez a usar entre los diferentes sistemas, el usar estribos del número 2.5 (diámetro de 7.9 mm), permitió satisfacer las demandas de cortante para la mayoría de los casos (figuras 4.3, 4.5 y 4.7), con excepción de las vigas para los modelos más esbeltos cuando el aporte de rigidez del marco era mayor ($\alpha=0.75$), como se aprecia en la figura 4.9.

En el detallado por confinamiento dúctil, existe una diferencia acerca del menor diámetro a utilizar en estribos para miembros a flexión y a flexocompresión. Para los elementos a flexión se especifica, al igual que para marcos no dúctiles, que el menor diámetro posible a utilizar en estribos es del No. 2.5 (Ap. 7.2.3 y 7.2.4.2 NTCC-04); mientras que para los elementos a flexocompresión, define que el refuerzo transversal debe estar formado por estribos cerrados con diámetro no menor al No. 3 o 9.5 mm (Ap. 7.3.4 NTCC-04). Estos requisitos hacen que las vigas no presenten diferencia en el diámetro utilizado por los estribos entre el diseño para marcos no dúctiles y la adición de los requisitos por confinamiento dúctil.

De manera esquemática, se aprecia que los estribos de las vigas mostradas en las figuras 4.3 a 4.8, se encuentran representados con color rojo para los estribos No. 2.5 usado para dichos elementos. Para demandas grandes de cortante en los modelos esbeltos, el color de los estribos en vigas es azul (estribos No. 3), como se aprecia en las figuras 4.9 y 4.10. Además, con el procedimiento de diseño para marcos no dúctiles, en todas las columnas de todos los modelos se usaron estribos No. 2.5. La adición de los requisitos mínimos por confinamiento dúctil implica que fue necesario que en la mayoría de las columnas se utilizaran estribos del No. 3 (color azul), con diferencias en las columnas del último nivel de las figuras 4.6, 4.8 y

4.10, donde se necesitaron estribos del No. 4 (color verde) para satisfacer la condición de cuantía mínima de refuerzo transversal que se indica en el Ap. 7.3.4c, cuando se usa la separación mínima y el número máximo posible de ramas entre estribos.

Tabla 4.2. Diferencias de armado por confinamiento, modelo 15N, $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$ (unidades: cm)

	Entrepisos	b	h	Confinamiento en los Extremos		Confinamiento en el Centro	
				No Dúctil	Dúctil	No Dúctil	Dúctil
Vigas	V 1-5	60	90	4 No. 2.5 @ 30	6 No. 2.5 @ 15	4 No. 2.5 @ 35	6 No. 2.5 @ 20
	V 6-10	50	75	3 No. 2.5 @ 25	6 No. 2.5 @ 15	3 No. 2.5 @ 30	6 No. 2.5 @ 20
	V 11-15	40	65	3 No. 2.5 @ 30	4 No. 2.5 @ 15	3 No. 2.5 @ 35	4 No. 2.5 @ 20
Columnas	C 1-5	90	90	6 No. 2.5 @ 15	6 No. 3 @ 8	6 No. 2.5 @ 30	6 No. 3 @ 15
	C 6-10	80	80	6 No. 2.5 @ 15	6 No. 3 @ 10	6 No. 2.5 @ 30	6 No. 3 @ 15
	C 11-15	70	70	4 No. 2.5 @ 12.5	4 No. 4 @ 10	4 No. 2.5 @ 25	4 No. 4 @ 15

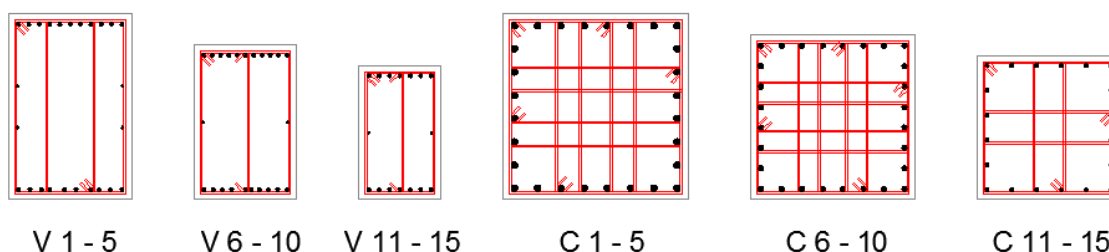


Figura 4.3. Armado de elementos, modelo de 15 niveles, $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$, confinamiento NO dúctil

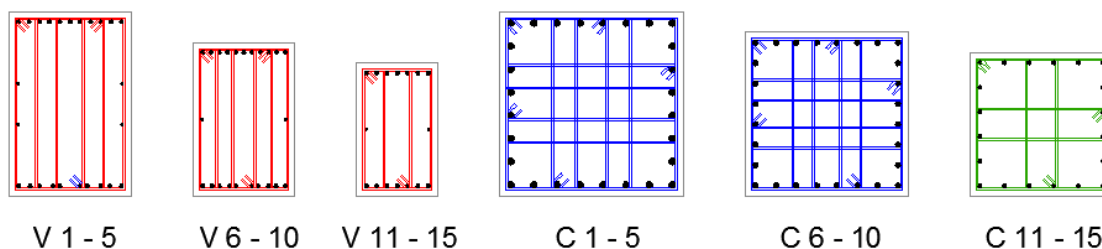


Figura 4.4. Armado de elementos para modelo de 15 niveles, $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$, confinamiento dúctil

Tabla 4.3. Diferencias de armado por confinamiento, modelo 15N, $\alpha=0.75$, $\beta=0.50$ (unidades: cm)

	Entrepisos	b	h	Confinamiento en los Extremos		Confinamiento en el Centro	
				No Dúctil	Dúctil	No Dúctil	Dúctil
Vigas	V 1-5	60	90	3 No. 2.5 @ 20	5 No. 2.5 @ 15	3 No. 2.5 @ 25	5 No. 2.5 @ 20
	V 6-10	50	75	3 No. 2.5 @ 20	4 No. 2.5 @ 15	3 No. 2.5 @ 25	4 No. 2.5 @ 20
	V 11-15	40	65	2 No. 2.5 @ 20	4 No. 2.5 @ 10	2 No. 2.5 @ 25	4 No. 2.5 @ 15
Columnas	C 1-5	85	85	5 No. 2.5 @ 15	5 No. 3 @ 8	5 No. 2.5 @ 30	5 No. 3 @ 15
	C 6-10	75	75	6 No. 2.5 @ 15	6 No. 3 @ 10	6 No. 2.5 @ 30	6 No. 3 @ 15
	C 11-15	65	65	4 No. 2.5 @ 15	4 No. 3 @ 8	4 No. 2.5 @ 30	4 No. 3 @ 15

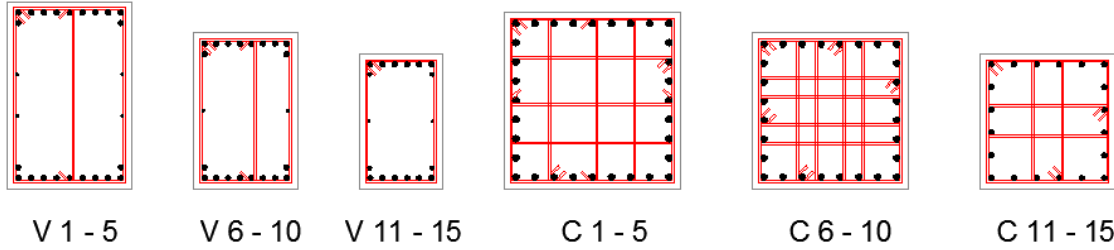


Figura 4.5. Armado de elementos, modelo de 15 niveles, $\alpha=0.75$, $\beta=0.50$, confinamiento NO dúctil

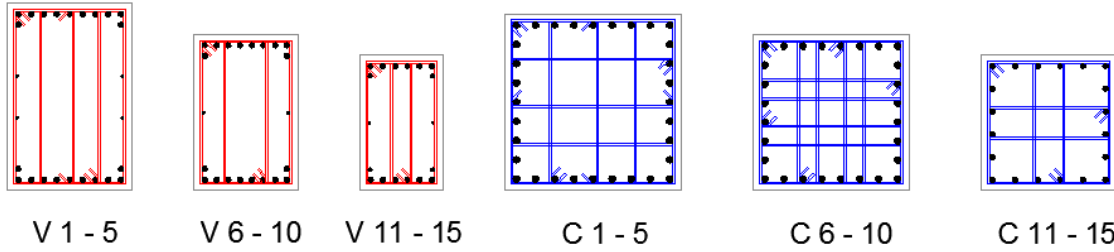


Figura 4.6. Armado de elementos para modelo de 15 niveles, $\alpha=0.75$, $\beta=0.50$, confinamiento dúctil

Tabla 4.4. Diferencias de armado por confinamiento, modelo 25N, $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$ (unidades: cm)

	Entrepisos	b	h	Confinamiento en los Extremos		Confinamiento en el Centro	
				No Dúctil	Dúctil	No Dúctil	Dúctil
Vigas	V 1-5	75	110	3 No. 3 @ 25	6 No. 3 @ 15	3 No. 3 @ 30	6 No. 3 @ 20
	V 6-10	65	100	4 No. 2.5 @ 25	6 No. 2.5 @ 15	4 No. 2.5 @ 30	6 No. 2.5 @ 20
	V 11-15	55	85	3 No. 2.5 @ 25	5 No. 2.5 @ 15	3 No. 2.5 @ 30	5 No. 2.5 @ 20
	V 16-20	45	70	3 No. 2.5 @ 25	4 No. 2.5 @ 15	2 No. 2.5 @ 30	4 No. 2.5 @ 20
	V 21-25	35	55	2 No. 2.5 @ 20	3 No. 2.5 @ 10	2 No. 2.5 @ 25	3 No. 2.5 @ 15
Columnas	C 1-5	150	150	13 No. 2.5 @ 15	13 No. 3 @ 10	13 No. 2.5 @ 35	13 No. 3 @ 15
	C 6-10	135	135	12 No. 2.5 @ 20	12 No. 3 @ 10	12 No. 2.5 @ 35	12 No. 3 @ 15
	C 11-15	120	120	10 No. 2.5 @ 20	10 No. 3 @ 10	10 No. 2.5 @ 35	10 No. 3 @ 15
	C 16-20	105	105	8 No. 2.5 @ 15	8 No. 3 @ 10	8 No. 2.5 @ 30	8 No. 3 @ 15
	C 21-25	90	90	4 No. 2.5 @ 12.5	4 No. 4 @ 10	4 No. 2.5 @ 25	4 No. 4 @ 15

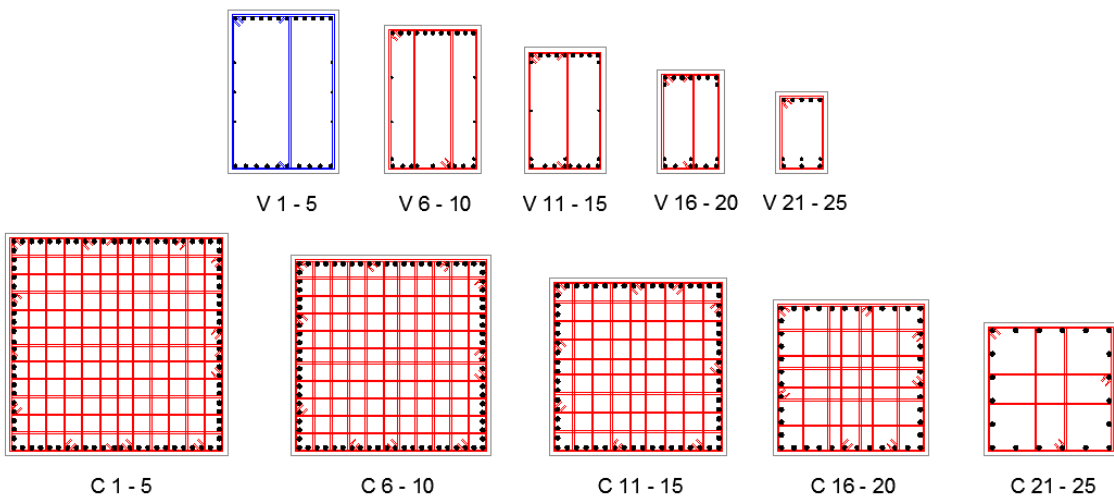


Figura 4.7. Armado de elementos, modelo de 25 niveles, $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$, confinamiento NO dúctil

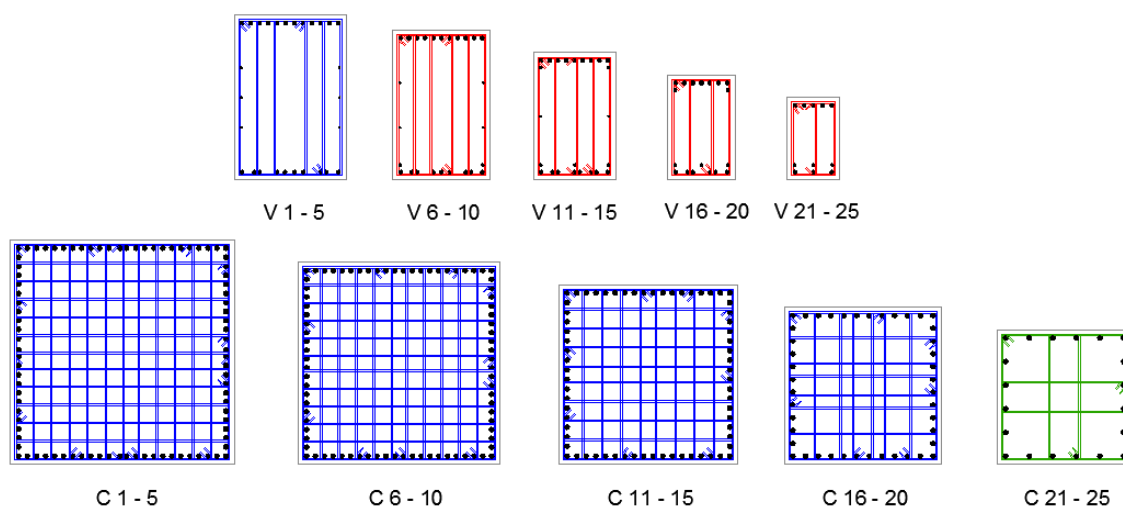


Figura 4.8. Armado de elementos para modelo de 25 niveles, $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$, confinamiento dúctil

Tabla 4.5. Diferencias de armado por confinamiento, modelo 25N, $\alpha=0.75$, $\beta=0.50$ (unidades: cm)

	Entrepisos	b	h	Confinamiento en los Extremos		Confinamiento en el Centro	
				No Dúctil	Dúctil	No Dúctil	Dúctil
Vigas	V 1-5	85	125	6 No. 3 @ 25	8 No. 3 @ 15	6 No. 3 @ 30	8 No. 3 @ 20
	V 6-10	75	115	6 No. 3 @ 25	7 No. 3 @ 20	6 No. 3 @ 30	7 No. 3 @ 25
	V 11-15	70	105	4 No. 3 @ 20	6 No. 3 @ 15	4 No. 3 @ 25	6 No. 3 @ 20
	V 16-20	60	90	4 No. 3 @ 25	6 No. 3 @ 15	4 No. 3 @ 30	6 No. 3 @ 20
	V 21-25	50	75	2 No. 3 @ 25	4 No. 3 @ 15	2 No. 3 @ 30	4 No. 3 @ 20
Columnas	C 1-5	145	145	13 No. 2.5 @ 15	13 No. 3 @ 10	13 No. 2.5 @ 35	13 No. 3 @ 15
	C 6-10	130	130	12 No. 2.5 @ 15	12 No. 3 @ 10	12 No. 2.5 @ 35	12 No. 3 @ 15
	C 11-15	120	120	10 No. 2.5 @ 20	10 No. 3 @ 10	10 No. 2.5 @ 35	10 No. 3 @ 15
	C 16-20	105	105	8 No. 2.5 @ 20	8 No. 3 @ 10	8 No. 2.5 @ 35	8 No. 3 @ 15
	C 21-25	90	90	4 No. 2.5 @ 20	4 No. 4 @ 10	4 No. 2.5 @ 35	4 No. 4 @ 15

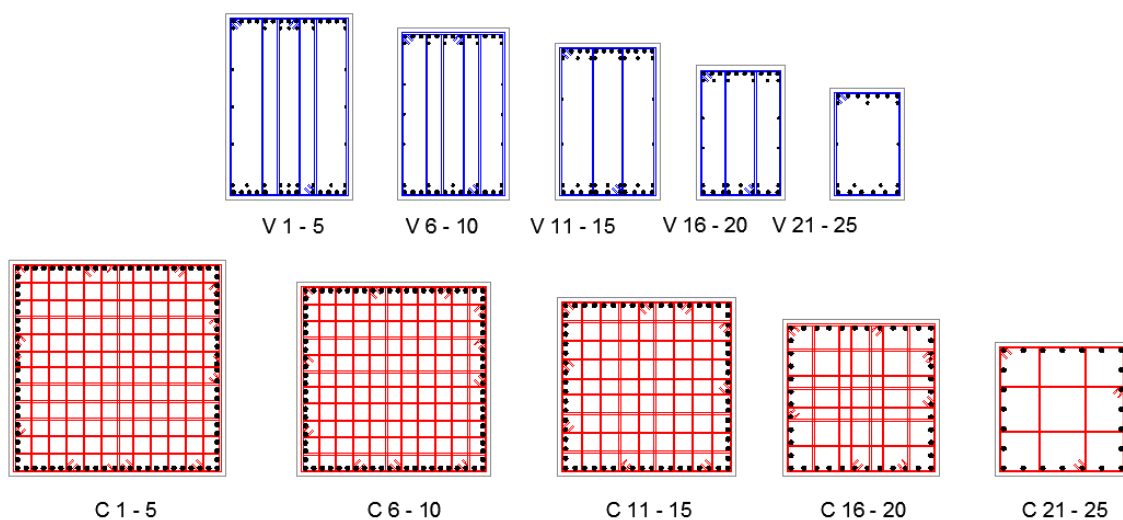


Figura 4.9. Armado de elementos, modelo de 25 niveles, $\alpha=0.75$, $\beta=0.50$, confinamiento NO dúctil

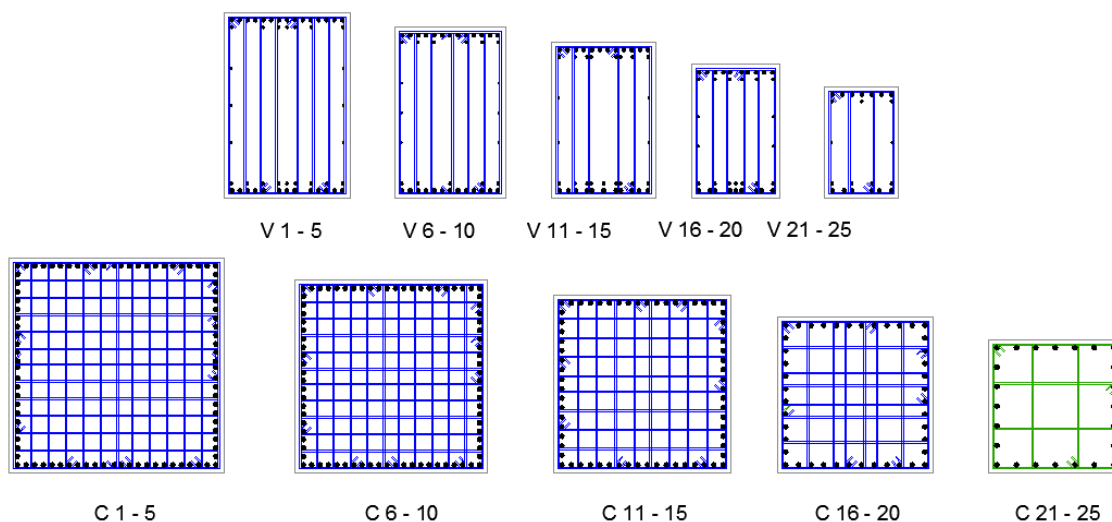


Figura 4.10. Armado de elementos, modelo de 25 niveles, $\alpha=0.75$, $\beta=0.50$, confinamiento dúctil

El diámetro utilizado en los estribos es una diferencia importante en la adición de los requisitos de diseño por confinamiento dúctil, sobre todo en columnas. Sin embargo, si se observa el número de ramas de estribos utilizado en los armados por confinamiento no dúctil y dúctil, éstas son muy similares (tablas 4.2 a 4.5), y se debe a la condición de detallado del Ap. 6.2.3.3, que especifica que los estribos se dispondrán de manera que cada barra longitudinal de esquina y una de cada dos consecutivas de la periferia tenga un soporte lateral suministrado por el doblez de un estribo (NTCC-04 2004). Para el caso de las vigas, en los requisitos de detallado para marcos no dúctiles, no se especifica el uso del apartado anteriormente descrito. Debido a esto, las vigas con detallado no dúctil tienen menor número de ramas de estribos (figuras 4.3, 4.5 y 4.7), que las vigas con detallado por confinamiento dúctil (figuras 4.4, 4.6 y 4.8), dado que en el Ap. 7.2.3d se especifica que se debe de cumplir del Ap. 6.2.3.3, asociado al número de ramas de estribos a utilizar.

Como se aprecia de las tablas 4.2 a 4.5, el parámetro más importante y que hace mayor diferencia entre el uso de confinamiento no dúctil y confinamiento dúctil es la separación de los estribos. Para la condición de confinamiento no dúctil en vigas, la separación de los estribos está condicionada a los Aps. 2.5.2.2 y 2.5.2.3 (NTCC-04 2004), y aunado al hecho de la distribución de la fuerza cortante de diseño entre el sistema del marco y del sistema contraviento-disipador, las separaciones entre los estribos son suficientemente holgadas para satisfacer la demanda de fuerza cortante (figura 4.11). Para el requisito de confinamiento dúctil en vigas, la separación máxima de los estribos en la zona de los extremos del miembro se encuentra delimitada por las condicionantes del Ap. 7.2.3b, del cual el que rige, en la mayoría de los casos, es el valor asociado a 24 veces el diámetro de la barra del estribo utilizada. Por lo tanto, para ciertos balances y condiciones de diseño, la diferencia en la separación de los estribos puede reducirse a la mitad, si se usan los requisitos de detallado por confinamiento dúctil, como se aprecia en la figura 4.12.

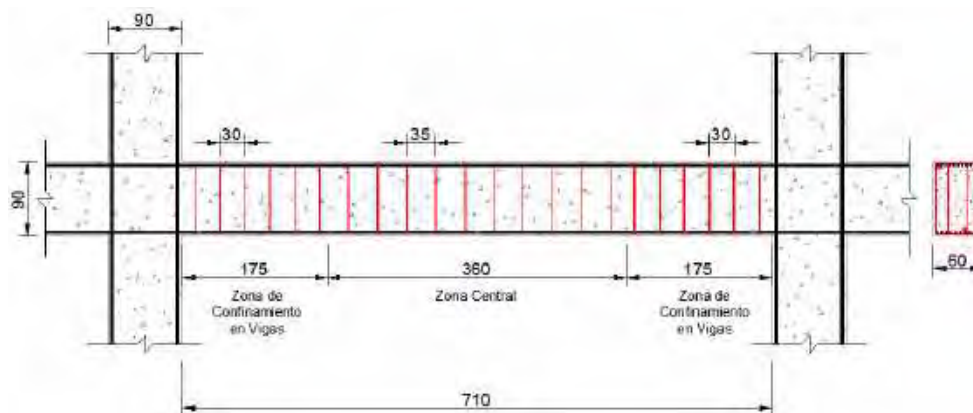


Figura 4.11. Detallado de vigas, confinamiento NO dúctil, modelo de 15 niveles, $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$

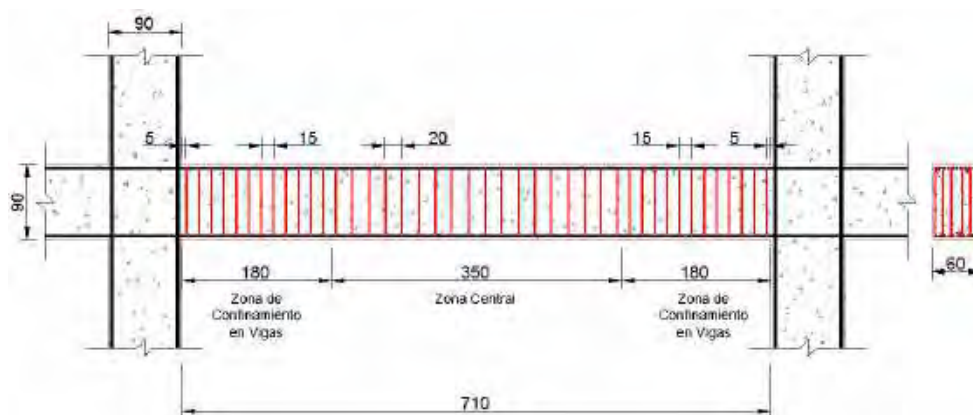


Figura 4.12. Detallado de vigas por confinamiento dúctil, modelo de 15 niveles, $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$

En el caso de la separación de los estribos en columnas, para la condición de diseño por confinamiento no dúctil (figura 18), ésta estuvo determinada por el requisito de separación máxima permisible indicada en el Ap. 6.2.3.2 (NTCC-04). Lo anterior se debe, principalmente, a que las secciones transversales de las columnas son lo suficientemente robustas y, asociado a su armado longitudinal, cubren la demanda de cortante para elementos a flexocompresión que se especifica en el Ap. 2.5.1.3 (NTCC-04).

Para los requisitos por confinamiento dúctil de elementos a flexocompresión (figura 4.14), la separación del refuerzo transversal se definió acorde al Ap. 7.3.4 (NTCC-04), donde se establece que no se debe exceder de la cuarta parte de la menor dimensión transversal del elemento, seis veces el diámetro de la barra longitudinal más gruesa o de 10 cm. Para los marcos evaluados en esta sección, dicha separación no excedió de 10 cm para la condición de confinamiento dúctil, dado que para obtener una separación menor, se debería utilizar una sección transversal menor de 40 cm o armados longitudinales con varillas de diámetro de 5/8" o menores, que no se utilizaron para ningún balance de rigidez evaluado. Además, fueron pocos los casos donde la separación usada fue menor de 10 cm (Tabla 4.3), sobre todo donde disminuir la separación entre los estribos era más eficiente que aumentar el diámetro, o colocar una rama extra de estribo (figura 4.6).

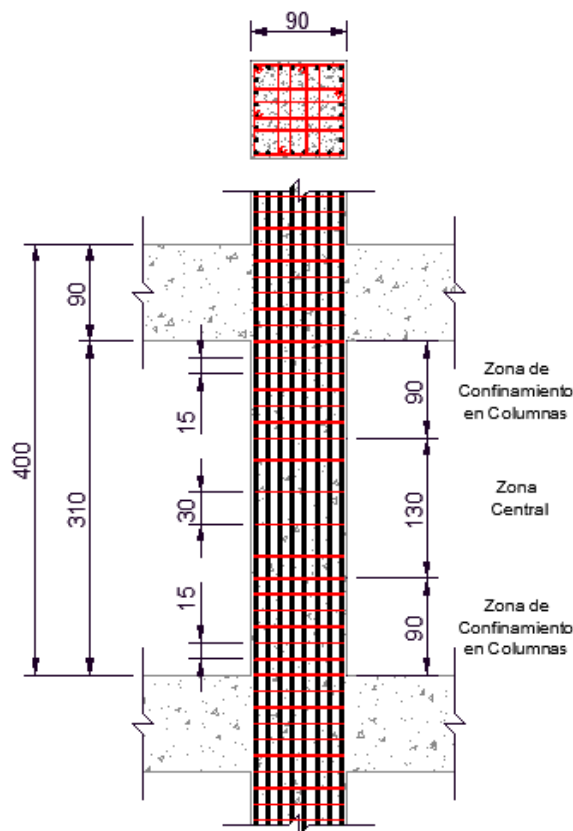


Figura 4.13. Detallado de columnas, modelo de 15 niveles con $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$, confinamiento NO dúctil

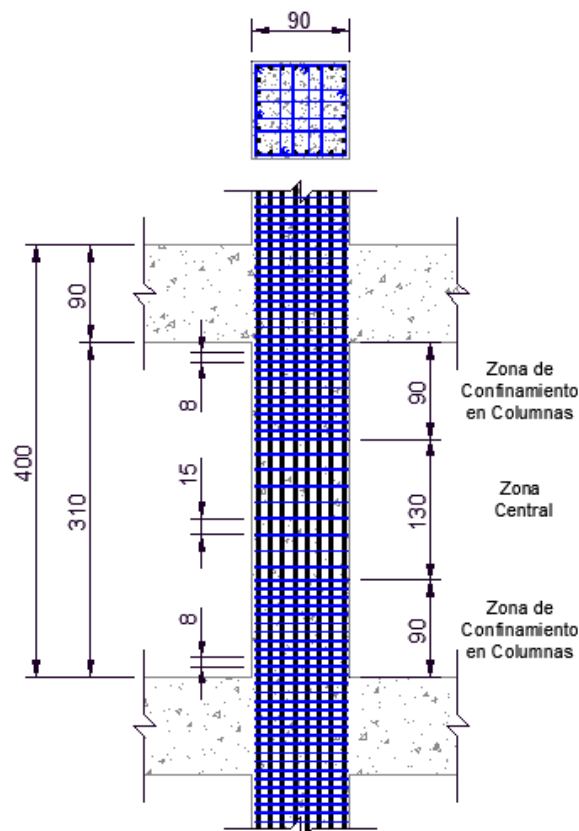


Figura 4.14. Detallado de columnas, modelo de 15 niveles con $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$, confinamiento dúctil

El uso de los requisitos mínimos para confinamiento dúctil podría suponer un gran aumento en el presupuesto directo por insumos que representa la disminución en la separación entre los estribos, el aumento del diámetro mínimo para utilizar en vigas, o por el uso de las ramas necesarias para cumplir con las especificaciones solicitadas por la reglamentación mexicana en dicha cuestión. Por esta razón, se realizó una cuantificación de la cantidad de insumos necesarios para la construcción de los elementos que conforman el sistema del marco de los modelos evaluados. En primera instancia, se compara la diferencia en pesos del uso de detallado transversal con las especificaciones de marcos no dúctiles contra el detallado transversal dúctil. Como comparativa final, se utiliza el costo directo de la construcción de todos los elementos del marco.

En la tabla 4.6 se resumen los pesos cuantificados en toneladas del acero transversal y longitudinal, utilizados en los diferentes balances de rigidez. Se aprecia que el uso de detallado transversal para confinamiento dúctil implica un aumento de más de 2.5 veces en peso del refuerzo transversal exclusivamente, comparado contra no usar dicha adición en el procedimiento de diseño convencional para marcos no dúctiles. La mayor diferencia se presenta para el modelo de 15 niveles con balance de rigidez $\alpha=0.50$, donde el diámetro del estribo utilizado en columnas paso del número 2.5 al número 4 para todas las columnas de dicho modelo.

Tabla 4.6. Cuantificación de acero de refuerzo transversal y longitudinal de elementos de concreto

Niveles	Balances de Rigidez	Rfzo. Transversal (tonelada)		(%) Peso	Rfzo. Longitudinal (tonelada)	Rfzo. Transversal + Longitudinal (t)		(%) Peso
		No Dúctil	Dúctil			No Dúctil	Dúctil	
5	$\alpha=0.25$	7.2	21.4	295.6%	63.1	70.4	84.5	120.1%
	$\alpha=0.50$	9.2	27.1	293.1%	69.8	79.0	96.9	122.6%
	$\alpha=0.75$	12.2	35.7	293.4%	80.6	92.8	116.3	125.3%
10	$\alpha=0.25$	26.4	88.6	335.3%	163.2	189.6	251.8	132.8%
	$\alpha=0.50$	24.7	77.6	314.3%	176.8	201.5	254.4	126.3%
	$\alpha=0.75$	24.5	58.1	237.6%	166.1	190.6	224.2	117.7%
15	$\alpha=0.25$	41.1	125.4	305.4%	288.7	329.7	414.1	125.6%
	$\alpha=0.50$	35.9	134.9	375.8%	341.3	377.2	476.2	126.3%
	$\alpha=0.75$	38.9	102.7	264.2%	389.3	428.2	492.1	114.9%
20	$\alpha=0.25$	81.5	235.6	289.3%	712.5	793.9	948.1	119.4%
	$\alpha=0.50$	108.2	285.1	263.5%	751.7	859.9	1036.8	120.6%
	$\alpha=0.75$	117.8	329.0	279.4%	781.1	898.8	1110.1	123.5%
25	$\alpha=0.25$	167.3	479.2	286.5%	1140.4	1307.7	1619.6	123.9%
	$\alpha=0.50$	183.6	483.8	263.5%	1163.6	1347.2	1647.4	122.3%
	$\alpha=0.75$	230.3	577.9	251.0%	1266.1	1496.3	1844.0	123.2%

Si se compara el peso total del acero de refuerzo utilizado (refuerzo transversal y refuerzo longitudinal), para columnas, vigas principales, vigas secundarias y losas de concreto, la diferencia en peso disminuye considerablemente. En promedio, el uso del detallado por confinamiento dúctil implica un aumento de apenas el 25% del peso total de acero de refuerzo cuantificado para los diversos modelos evaluados, aunque la variación en peso oscila en un intervalo entre el 15% y el 30%, dependiendo del balance de rigidez usado. La menor diferencia en peso del acero de refuerzo se presentó para el modelo de 15 niveles con balance $\alpha=0.75$ (Tabla 4.3), a pesar de que se aumentó el número de ramas de estribos usadas en vigas, además del aumento del diámetro utilizado para los estribos de las columnas (figura 4.5 y 4.6).

En la tabla 4.7 se presenta una comparativa de costos en insumos, y la variación del usar o no usar los requisitos mínimos de confinamiento dúctil para los elementos involucrados en la construcción del sistema del marco de las estructuras con disipadores de energía por histéresis del material. Los precios en esta tabla son precios comerciales durante el segundo semestre del año 2015 en la zona metropolitana de la Ciudad de México, con un costo de \$1,867.60/m³ de concreto premezclado con resistencia a compresión de $f'_c=250\text{kg/cm}^2$ y de \$12,180.00/ton para el acero de refuerzo con diámetros de No. 2.5 al No. 12. Dentro de la cuantificación se tomaron en cuenta, además de los elementos primarios del marco (vigas y columnas), la volumetría del sistema de piso diseñado como losa maciza de concreto reforzado de 12 cm de espesor y de vigas secundarias para control de deflexiones.

Tabla 4.7. Comparativa de precios entre el uso de detallado dúctil por confinamiento y no usarlo

No. De Niveles	Balances de Rigidez	Concreto (m³)	Rfzo. Transversal + Longitudinal(t)		Concreto + Acero de refuerzo (\$ Millones de MXN 2015)		(%) Precio 2015	Concreto + Acero de refuerzo (\$ Millones de MXN 2018)		(%) Precio 2018
			No Dúctil	Dúctil	No Dúctil	Dúctil		No Dúctil	Dúctil	
5	$\alpha=0.25$	809.4	70.4	84.5	\$2.37	\$2.54	107.3%	\$3.27	\$3.57	109.2%
	$\alpha=0.50$	858.8	79.0	96.9	\$2.57	\$2.78	108.5%	\$3.56	\$3.94	110.7%
	$\alpha=0.75$	930.4	92.8	116.3	\$2.87	\$3.15	110.0%	\$4.01	\$4.51	112.5%
10	$\alpha=0.25$	2275.5	189.6	251.8	\$6.56	\$7.32	111.5%	\$9.02	\$10.34	114.7%
	$\alpha=0.50$	2180.8	201.5	254.4	\$6.53	\$7.17	109.9%	\$9.07	\$10.19	112.4%
	$\alpha=0.75$	2275.5	190.6	224.2	\$6.57	\$6.98	106.2%	\$9.04	\$9.76	107.9%
15	$\alpha=0.25$	3535.7	329.7	414.1	\$10.62	\$11.65	109.7%	\$14.76	\$16.56	112.2%
	$\alpha=0.50$	3450.7	377.2	476.2	\$11.04	\$12.25	110.9%	\$15.59	\$17.70	113.5%
	$\alpha=0.75$	3450.7	428.2	492.1	\$11.66	\$12.44	106.7%	\$16.68	\$18.04	108.2%
20	$\alpha=0.25$	5552.7	793.9	948.1	\$20.04	\$21.92	109.4%	\$29.07	\$32.35	111.3%
	$\alpha=0.50$	6286.4	859.9	1036.8	\$22.21	\$24.37	109.7%	\$32.08	\$35.85	111.7%
	$\alpha=0.75$	6286.4	898.8	1110.1	\$22.69	\$25.26	111.3%	\$32.91	\$37.41	113.7%
25	$\alpha=0.25$	7931.9	1307.7	1619.6	\$30.74	\$34.54	112.4%	\$45.22	\$51.86	114.7%
	$\alpha=0.50$	8049.4	1347.2	1647.4	\$31.44	\$35.10	111.6%	\$46.32	\$52.71	113.8%
	$\alpha=0.75$	8960.5	1496.3	1844	\$34.96	\$39.20	112.1%	\$51.49	\$58.89	114.4%

Para el segundo semestre del 2018 los precios del concreto premezclado y de la tonelada de acero de refuerzo aumentaron en un 17% y 75% respectivamente con respecto a los precios cotizados tres años antes. El principal incremento del acero de refuerzo se suscitó en el año 2016 debido a la depreciación del peso mexicano con respecto al dólar y a la reducción de la producción nacional en un 10.1% con respecto al primer semestre del 2012 (CEESCO 2016).

De manera general, se aprecia de la tabla 4.7 que los costos en insumos son mayores conforme el balance “ α ” va en aumento. Comparando los mismos requisitos de detallado para los diferentes balances de rigidez entre los precios del 2015 y 2018, se observa que la menor variación se presenta en los modelos de 10 niveles y $\alpha=0.75$, donde la variación en costos es del 7% en promedio. Además, comparando todos los modelos con sus distintos balances de rigidez, se distingue que el usar o no usar un detallado por confinamiento dúctil tiene una variación en costos de insumo del 10% en promedio tomando en cuenta los precios del 2015; éste oscila en un intervalo entre el 6% y el 12%, siendo los modelos más esbeltos estudiados donde se aprecia la mayor diferencia en costos entre el tipo de detallado transversal utilizado.

Por otra parte, el incremento de costo en los insumos de construcción, tiene un impacto poco significativo si se toma a éste como parámetro de decisión entre usar o no usar un detallado dúctil; es decir, a pesar del incremento excesivo en el precio del acero de refuerzo, actualmente usar un detallado dúctil repercute en un incremento máximo del 15% en costo de insumo comparándolo contra utilizar un detallado transversal no dúctil. Por lo tanto, el impacto económico real es mucho menor, dado que no se incluyeron los costos de contravientos y disipadores (que son los mismos en los modelos sin confinamiento dúctil y con confinamiento dúctil), y los de la cimentación, que muy probablemente sería la misma también, dado que el incremento del peso total de los componentes del marco sería poco significativo.

A pesar que la anterior comparativa de costos se realizó para edificaciones de concreto reforzado, existen estudios de índole similar para una edificación de acero con el uso de contravientos restringidos a pandeo y contravientos convencionales. El sobre costo del contraviento restringido contra pandeo se compensa por el ahorro en otros elementos estructurales como son columnas y vigas (20% menor en comparación con los contravientos convencionales), conexiones más ligeras y menores descargas al suelo con el consecuente ahorro en cimentación. El ahorro en tiempo de ejecución también se reduce ya que se tienen que montar perfiles más ligeros y hacer conexiones con menor número de tornillos o menos soldadura de campo (Coeto 2013).

4.3 Resultados de análisis estáticos no lineales para marcos de concreto con disipadores de energía

Se efectuaron análisis estáticos no lineales bajo cargas laterales monótonas crecientes con el programa DRAIN-2DX (Prakash *et al.* 1992). Se presentan resultados característicos para los diversos modelos evaluados con comparativas entre diagramas tomando en cuenta ductilidades locales de los disipadores (μ_d), curvas de cortante basal normalizado - distorsión global de azotea, y mapeos de fluencias para los distintos balances de rigidez evaluados. El objetivo principal es analizar si los requisitos de detallado por confinamiento dúctil, explicados en párrafos anteriores, son suficientes para hacer que el mecanismo estructural de estos sistemas sea más eficiente para los balances de rigidez evaluados en estos casos de estudio.

En la figura 4.15 se presentan los diagramas de deformación inelástica de los disipadores de energía para marcos con detallado por confinamiento dúctil. En el eje horizontal se define la ductilidad local desarrollada por cada uno de los disipadores utilizados para los entrepisos asociados en el eje vertical. Las líneas punteadas representan los límites entre los cuales los disipadores presentan un desempeño eficiente ($8 \leq \mu_d \leq 12$). En esta figura, se hace la comparación entre los diferentes aportes de rigidez del marco y del sistema contraviento-disipador (α), y de manera separada, la comparativa entre la variación de rigidez del disipador con respecto al contraviento de soporte (β). Se aprecia que el balance en el cuál los disipadores desarrollan mayores ductilidades es cuando el marco aporta menor rigidez al

sistema completo ($\alpha=0.25$), dando oportunidad que más de la mitad de los disipadores de la estructura alcancen una ductilidad adecuada ($\mu_d=6.0$). Además, se aprecia que conforme la rigidez del disipador es menor que la del contraviento ($\beta=0.50$), las magnitudes de las ductilidades desarrolladas por los disipadores son mayores, especialmente cuando los elementos del marco aportan mayor rigidez al sistema global ($\alpha=0.75$).

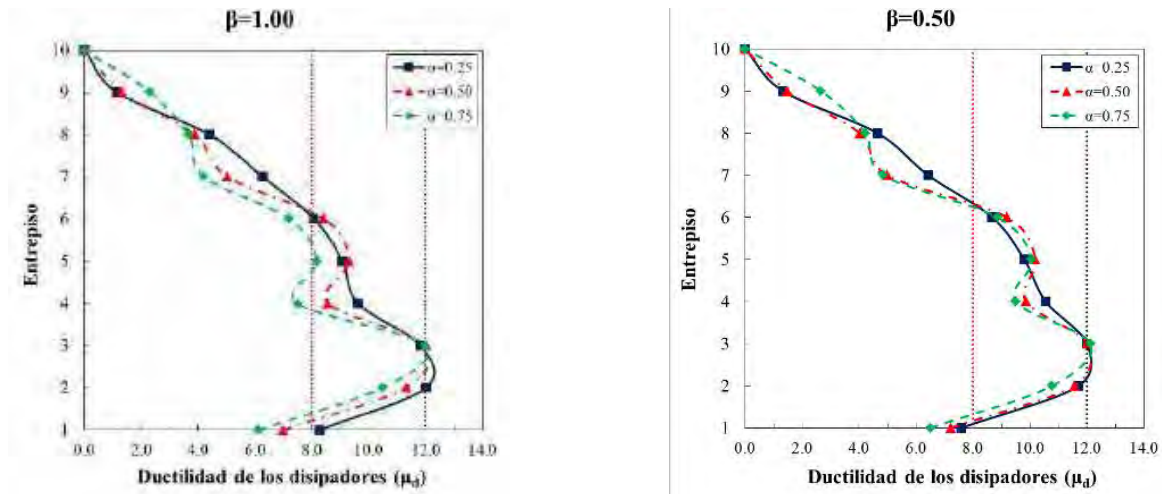


Figura 4.15. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en modelos de 10 niveles con detallado por confinamiento dúctil

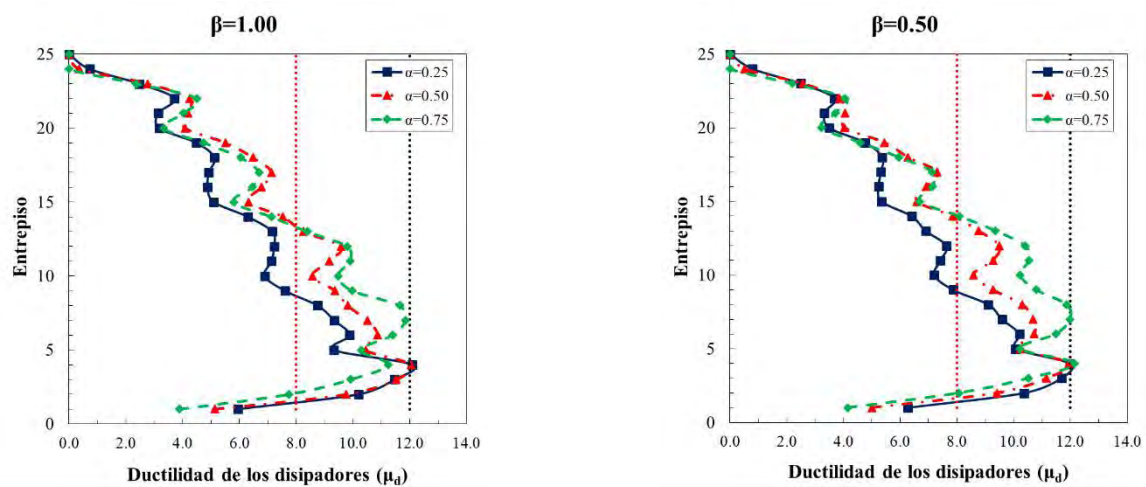


Figura 4.16. Comparativa de ductilidades de los disipadores μ_d en modelos de 25 niveles con detallado por confinamiento dúctil

Conforme los modelos evaluados se vuelven más esbeltos, el balance de rigidez α , donde más disipadores alcanzan una ductilidad adecuada, es cuando el marco aporta mayor rigidez al sistema ($\alpha=0.50$ y $\alpha=0.75$). En la figura 4.16 se observa que menos de la mitad de los disipadores utilizados alcanzan su ductilidad objetivo para el balance de $\alpha=0.25$, sin importar el balance de rigidez β utilizado. Se infiere a partir de estos diagramas que, para el balance antes mencionado, el sistema contraviento-disipador es demasiado rígido para que los disipadores desarrollen ductilidades con magnitud de $\mu_d \geq 8.0$, y en conjunto con los mapeos

de fluencias inelásticas, curvas de cortante basal normalizado y curvas de distorsión global de azotea, que se expondrán a detalle más adelante, se podrá apreciar el efecto que tiene la variación del parámetro α en las estructuras esbeltas.

En las figuras 4.17 a 4.19 se grafican las curvas de cortante basal normalizado-distorsión global de azotea para los modelos evaluados con detallado por confinamiento dúctil. En el eje de las ordenadas está representada el valor de sobrerresistencia. En el eje de las abscisas se presenta la distorsión global alcanzada por el sistema en términos de porcentaje. En las figuras 4.17 y 4.18 se exhiben tres curvas diferentes para comparar el efecto de variar la relación de rigidez entre marco y el sistema contraviento-disipador (α). De forma general, se observa que conforme el valor “ α ” es menor, la ductilidad desarrollada por los modelos aumenta. De manera contraria, cuando la magnitud de “ α ” tiende a aumentar, se aprecia que los modelos de 15 niveles presentan menor nivel de sobrerresistencia (figura 4.17). Esta particularidad se fundamenta en el proceso de diseño de los contravientos; dado que deberán permanecer elásticos durante todo el evento, se sobrediseñan para que no desarrollen pandeo alguno y, conforme el marco aporta mayor rigidez, las secciones de los contravientos tienden a ser menores y, con ello, la sobrerresistencia que pueden desarrollar de manera local se ve reflejada en los parámetros globales.

También se aprecian diferencias entre las rigideces elásticas para los modelos conforme varía el parámetro α ; generalmente conforme α aumenta, la rigidez elástica disminuye (figura 4.17). Esta tendencia se observa para modelos constituidos por cinco, 10 y 15 entrepisos. En otras palabras, conforme el marco aporta menor rigidez al sistema, la estructura completa tiende a ser más rígida. Lo anterior se ve reflejado en que las secciones transversales tipo de los contravientos son más grandes, y transmiten mayor carga axial a las columnas y, por ende, éstas tienden a ser más robustas también (Tablas 4.8 y 4.10), con lo que el sistema global es más rígido cuando $\alpha=0.25$, dado que las secciones tipo se mantienen en varios niveles (figura 4.1).

A medida que los modelos son más esbeltos (20 y 25 niveles) se aprecia que a mayor valor de α , la estructura completa es más rígida también (figura 4.16). El efecto de axialización en columnas, ocasionado por la transferencia de carga axial de los contravientos a los elementos del marco, provoca que las secciones transversales de columnas y de vigas resulten más robustas para poder tomar las acciones de diseño. Por ello, se presentan en las tablas 4.8 a 4.11, las secciones transversales de los elementos de concreto, con su respectivo refuerzo longitudinal, y las secciones de acero utilizados en contravientos para los modelos de 15 y 25 niveles a diferente balance de rigidez α .

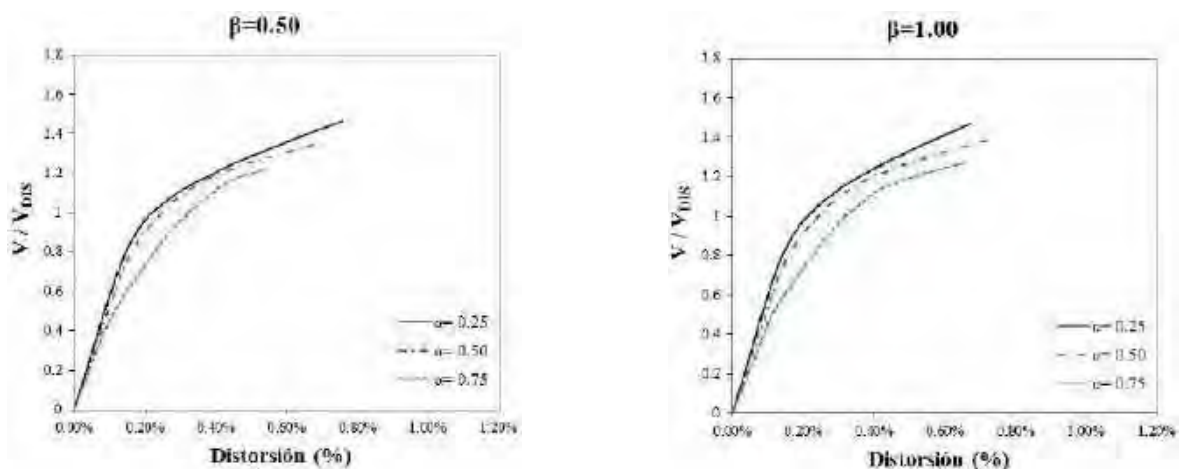


Figura 4.17. Curvas de cortante basal normalizado-distorsión global de azotea, modelos de 15 niveles con detallado por confinamiento dúctil

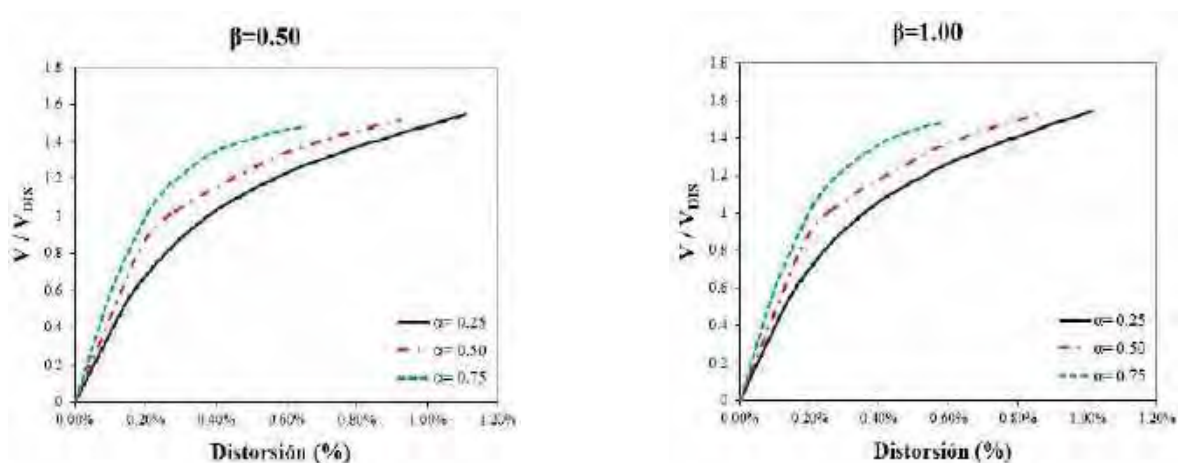


Figura 4.18. Curvas de cortante basal normalizado-distorsión global de azotea, modelos de 25 niveles con detallado por confinamiento dúctil

Tabla 4.8. Detallado de armado longitudinal, modelo 15 niveles, $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$, unidades: cm

	Entrepisos	b	h	Lecho Sup.	Lecho Inf.
Vigas	V 1-5	60	90	11 Vs No. 6	10 Vs No. 6
	V 6-10	50	75	11 Vs No. 6	10 Vs No. 6
	V 11-15	40	65	7 Vs No. 6	7 Vs No. 6
	Entrepisos	b	h	Rfzo. Longitudinal	Cuantía
Columnas	C 1-5	90	90	28 Vs No. 10	2.74%
	C 6-10	80	80	28 Vs No. 8	2.22%
	C 11-15	70	70	20 Vs No. 6	1.16%
	Entrepisos	b	h	t	
Contravientos	CV 1-3	55.88	55.88	7.62	
	CV 4-6	48.26	48.26	6.99	
	CV 7-10	40.64	40.64	5.72	
	CV 10-12	35.56	35.56	3.81	
	CV 13-15	30.48	30.48	3.18	

Tabla 4.9. Detallado de armado longitudinal, modelo 15 niveles, $\alpha=0.75$, $\beta=0.50$, unidades: cm

	Entrepisos	b	h	Lecho Sup.	Lecho Inf.
Vigas	V 1-5	60	90	9 Vs No. 8 + 2 Vs No. 8	9 Vs No. 8 + 2 Vs No. 8
	V 6-10	50	75	8 Vs No. 8 + 2 Vs No. 8	8 Vs No. 8 + 2 Vs No. 8
	V 11-15	40	65	6 Vs No. 8 + 2 Vs No. 6	6 Vs No. 8 + 2 Vs No. 6
	Entrepisos	b	h	Rfzo. Longitudinal	Cuantía
Columnas	C 1-5	85	85	32 Vs No. 10	3.51%
	C 6-10	75	75	28 Vs No. 10	3.94%
	C 11-15	65	65	20 Vs No. 8	2.40%
	Entrepisos	b	h	t	
Contravientos	CV 1-3	40.64	40.64	1.91	
	CV 4-6	35.56	35.56	1.91	
	CV 7-10	25.4	25.4	1.27	
	CV 10-12	20.32	20.32	0.95	
	CV 13-15	15.24	15.24	0.95	

Tabla 4.10. Detallado de armado longitudinal para modelo 25 niveles, $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$

	Entrepisos	b	h	Lecho Sup.	Lecho Inf.
Vigas	V 1-5	75	110	12 Vs No. 8	10 Vs No. 8
	V 6-10	65	100	11 Vs No. 8	9 Vs No. 8 + 2 Vs No. 6
	V 11-15	55	85	9 Vs No. 8 + 2 Vs No. 6	8 Vs No. 8 + 3 Vs No. 6
	V 16-20	45	70	7 Vs No. 8 + 2 Vs No. 6	6 Vs No. 8 + 3 Vs No. 6
	V 21-25	35	55	5 Vs No. 8	3 Vs No. 8 + 3 Vs No. 6
	Entrepisos	b	h	Rfzo. Longitudinal	Cuantía
Columnas	C 1-5	150	150	92 Vs No. 10	3.24%
	C 6-10	135	135	84 Vs No. 10	3.65%
	C 11-15	120	120	68 Vs No. 10	3.74%
	C 16-20	105	105	44 Vs No. 10	3.16%
	C 21-25	90	90	20 Vs No. 10	1.95%
	Entrepisos	b	h	t	
Contravientos	CV 1-4	71.12	71.12	25.72	
	CV 5-8	63.5	63.5	19.05	
	CV 9-12	50.8	50.8	17.78	
	CV 13-17	40.64	40.64	12.7	
	CV 18-21	30.48	30.48	7.62	
	CV 22-25	30.48	30.48	2.54	

Tabla 4.11. Detallado de armado longitudinal para modelo 25 niveles, $\alpha=0.75$, $\beta=0.50$

	Entrepisos	b	h	Lecho Sup.	Lecho Inf.
Vigas	V 1-5	85	125	15 Vs No. 8 + 7 Vs No. 6	13 Vs No. 8 + 9 Vs No. 6
	V 6-10	75	115	13 Vs No. 8 + 6 Vs No. 8	13 Vs No. 8 + 5 Vs No. 8
	V 11-15	70	105	12 Vs No. 8 + 8 Vs No. 6	11 Vs No. 8 + 9 Vs No. 6
	V 16-20	60	90	10 Vs No. 8 + 6 Vs No. 6	9 Vs No. 8 + 7 Vs No. 6
	V 21-25	50	75	7 Vs No. 8 + 3 Vs No. 6	6 Vs No. 8 + 4 Vs No. 6
	Entrepisos	b	h	Rfzo. Longitudinal	Cuántía
Columnas	C 1-5	145	145	92 Vs No. 10	3.46%
	C 6-10	130	130	84 Vs No. 10	3.94%
	C 11-15	120	120	68 Vs No. 10	3.74%
	C 16-20	105	105	44 Vs No. 10	3.16%
	C 21-25	90	90	24 Vs No. 10	2.35%
	Entrepisos	b	h	t	
Contravientos	CV 1-4	45.72	45.72	5.72	
	CV 5-8	40.64	40.64	4.45	
	CV 9-12	35.56	35.56	4.13	
	CV 13-17	30.48	30.48	3.81	
	CV 18-21	25.4	25.4	2.54	
	CV 22-25	20.32	20.32	1.59	

Para los modelos de 15 niveles, las secciones geométricas utilizadas para formar el marco son similares para ambos balances de “ α ”, con variación en los refuerzos longitudinales de vigas y columnas para satisfacer las demandas impuestas en el proceso de diseño, teniendo que proveer mayor cantidad de acero de refuerzo en $\alpha=0.75$ (Tabla 4.9). Para los modelos de 25 niveles, el refuerzo longitudinal empleado en los elementos de concreto fue cercano al máximo permisible para ambos balances de α , pero se decidió utilizar diferentes secciones transversales en vigas, siendo más robustas para el balance de rigidez $\alpha=0.75$ (Tabla 4.11). Con la anterior descripción, se infiere que para estructuras con disipadores de energía, diseñados con una metodología de balances de rigidez entre sus sistemas, la variación de las secciones de vigas y columnas, para diferentes balances de α , influyen en gran medida en la rigidez global del sistema completo en estructuras esbeltas.

En la figura 4.19 se observa que el sistema estructural completo desarrolla menor ductilidad conforme el valor de β es mayor, bajo las mismas condiciones de α . Se aprecian también diferencias en la rigidez elástica, debido a cambios en las secciones transversales de los contravientos pero sin variación en las secciones de vigas y columnas; y en la rigidez post-fluencia, consecuencia de las características del disipador obtenidas en su diseño. También es importante mencionar que conforme aumenta el número de niveles, la distorsión global desarrollada por los modelos es mayor, y su sobrerresistencia tiende a disminuir.

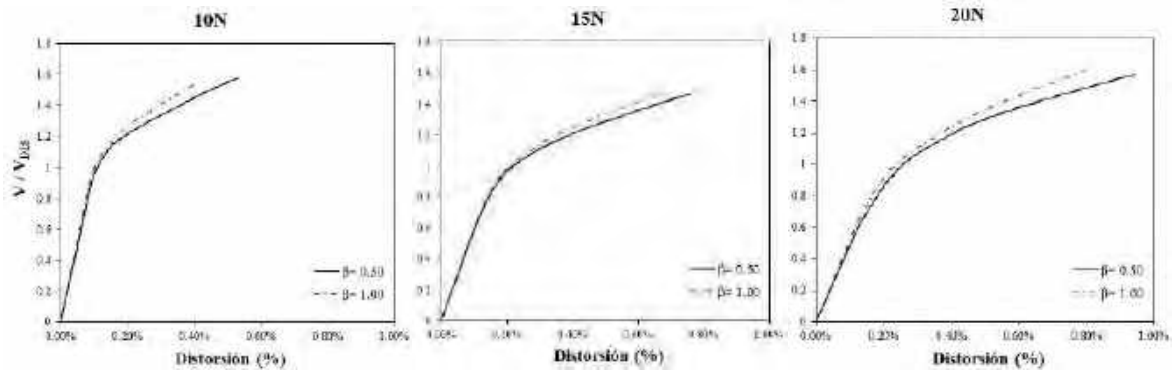


Figura 4.19. Comparativa curvas de cortante basal normalizado-distorsión global de azotea, $\alpha=0.25$ con detallado por confinamiento dúctil

La mejor manera de comparar el parámetro de confinamiento, acorde con los niveles de detallado dúctil que se proporcionaron a los elementos de concreto reforzado, es por medio del mapeo de fluencias inelásticas entre los marcos sin detallado dúctil y los correspondientes con detallado por confinamiento dúctil. Se utilizó el mismo código de colores detallados en la figura 3.6 para los elementos del marco como para los disipadores de energía. En las figuras 4.20 y 4.21 se presenta una comparativa para los modelos de 15 y 25 niveles respectivamente (con y sin confinamiento dúctil), a partir de los mapeos de fluencia correspondientes a la ductilidad objetivo de los disipadores μ_d , y se observan las diferencias de proveer a las estructuras con requisitos mínimos de detallado por confinamiento dúctil. Se aprecia que el uso de los requisitos antes mencionados proporciona una mayor capacidad de rotación elástica a vigas y columnas. Esto se observa de manera esquemática en el cambio de códigos de color en algunas vigas, pasando de amarillo a blanco (daño incipiente), y en el caso de las columnas se aprecia que las fluencias logran desaparecer y éstas permanecen elásticas, incluso para el modelo más esbelto.

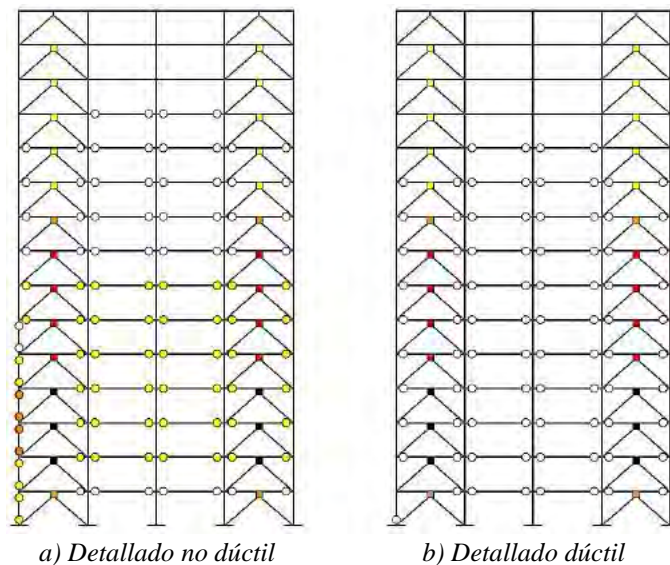


Figura 4.20. Comparativa de mapeos de fluencia a la ductilidad objetivo de los disipadores μ_d para modelos de 15 niveles con $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$

En la figura 4.22 se presenta el mapeo de fluencias a la ductilidad objetivo de los disipadores μ_d , para los modelos de 20 niveles con una rigidez de los disipadores equivalente a la mitad de rigidez del sistema de contraviento ($\beta=0.50$). A diferencia de los modelos de 5, 10 y 15 niveles, donde el balance óptimo era $\alpha=0.25$ (comportamiento representativo de la figura 4.20), para los modelos más esbeltos estudiados, en dicho balance se observa la formación de fluencias en ambos extremos de las columnas de la periferia. Además, el nivel de daño asociado a la fluencia de vigas ya no es incipiente, sino por el contrario, se prevé un daño notorio, por lo que en un evento post-sísmico requerirá de reparación, y con esto, el incumplimiento de la filosofía de diseño para estructuras con disipadores. Además, se observa que conforme el balance α aumenta, la magnitud de las rotaciones que se presentan en los modelos es menor. Esto es consecuencia del diseño de los elementos del marco, que conforme más rigidez toma este sistema, vigas y columnas se diseñan para que resistan más cortante del sistema global.

De manera similar que para el modelo de 20 niveles, en la figura 4.23 se presenta el mapeo de fluencias para el modelo de 25 niveles con diferentes balances de rigidez α . Se observa que para el balance $\alpha=0.25$ existen rotaciones no incipientes en vigas, así como fluencias en ambos extremos de las columnas en los entrepisos donde los disipadores alcanzan su ductilidad máxima. Observando el mapeo de rotaciones para los balances de $\alpha=0.50$ y $\alpha=0.75$, se aprecia que en el último, hay mayor cantidad de disipadores que alcanzan la ductilidad objetivo, pero si se compara la ductilidad global del sistema que puede desarrollar, el del balance $\alpha=0.75$ es menor al del balance de $\alpha=0.50$.

Con base en las observaciones señaladas a partir del análisis de los mapeos de fluencia, se concluye que conforme los modelos son más esbeltos, la rigidez necesaria que debe aportar el sistema del marco al sistema global (α) debe ser mayor para mitigar el efecto de la axialización de las columnas y un daño perceptible en las vigas, tal y como se aprecia de las figuras 4.22 y 4.23 para el balance de “ $\alpha=0.25$ ”.

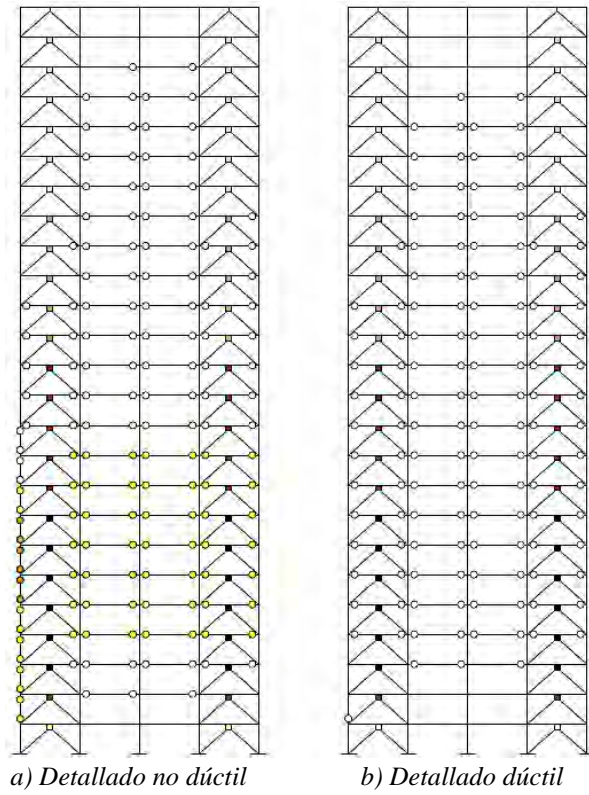


Figura 4.21. Comparativa de mapeos de fluencia a la ductilidad objetivo de los disipadores μ_d para modelos de 25 niveles con $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$

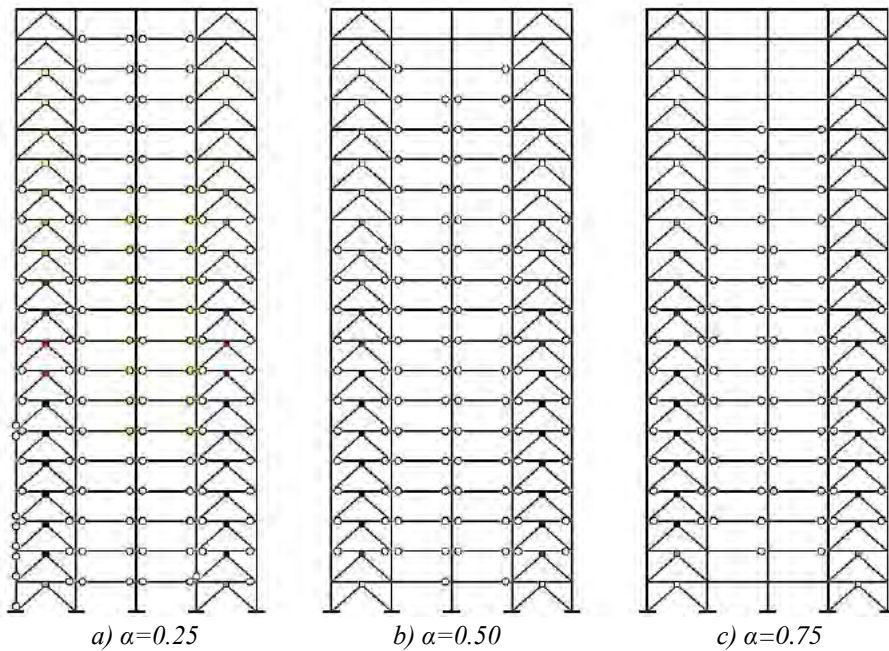


Figura 4.22. Comparativa de mapeos de fluencia a la ductilidad objetivo de los disipadores μ_d para modelos de 20 niveles con detallado por confinamiento dúctil con $\beta=0.50$

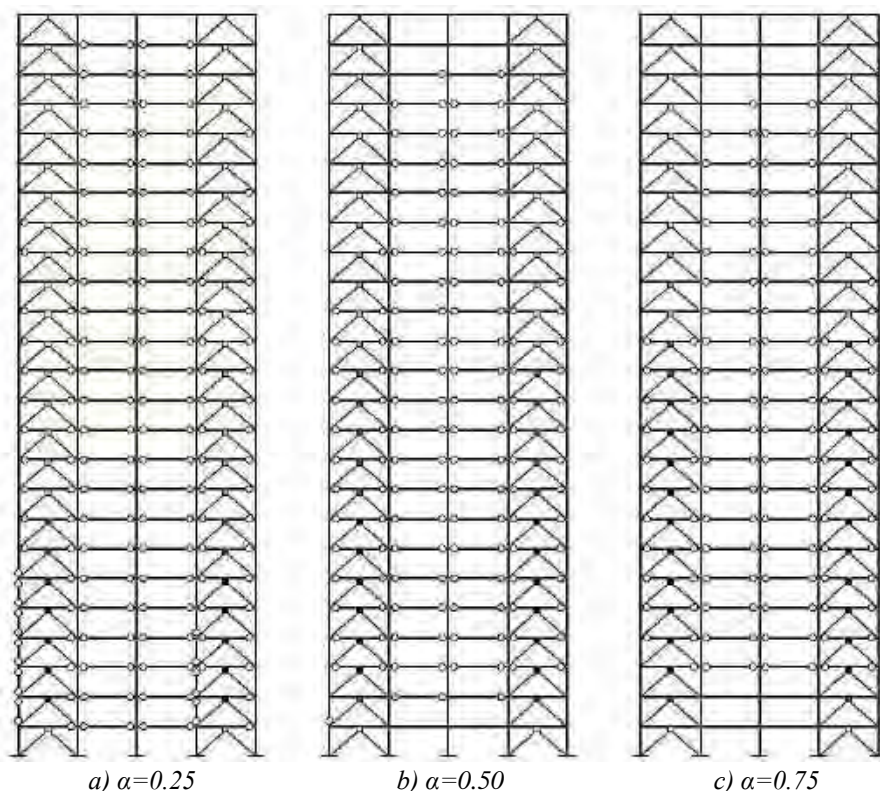


Figura 4.23. Comparativa de mapeos de fluencia a la ductilidad objetivo de los disipadores μ_d para modelos de 25 niveles con detallado por confinamiento dúctil con $\beta=0.50$

4.4 Balances de rigidez óptimos

En trabajos previos (Nangulasmú 2011, Tena y Nangulasmú 2013, Tena-Colunga y Nangulasmú-Hernández 2015), se observó que diseñar a los elementos de concreto reforzado con requisitos de marcos no dúctiles (NTCC 2004), fomenta la participación no lineal en vigas y columnas, por lo que el sistema estructural global no se comportará con un desempeño acorde con la filosofía de diseño de estructuras con disipadores de energía. Los balances “óptimos” que se obtuvieron para elementos de concreto sin detallados de confinamiento dúctil se indican en la tabla 4.12, donde los únicos modelos que se comportaron de manera satisfactoria fueron los más pequeños del estudio (marcos de cinco niveles). Los otros modelos tuvieron un desempeño aceptable, pero no del todo favorable, debido a que la participación no lineal no es exclusiva de los disipadores de energía.

En las tablas 4.12 y 4.13 se presenta el resumen con los parámetros recomendados asociados a los balances de rigidez entre los sistemas. Se usan tres colores para identificar el nivel de daño que se puede presentar si se elige alguna de las combinaciones mostradas en las tablas. El color blanco representa que las columnas permanecen elásticas cuando los disipadores desarrollan su ductilidad objetivo, mientras que las vigas pueden permanecer elásticas o tener una participación incipiente. El color amarillo, representa una participación no lineal incipiente en vigas y columnas. El color naranja, representa que vigas y columnas tienen una participación de mediana a importante en la no linealidad del sistema global.

Tabla 4.12. Parámetros estructurales recomendados para marcos de concreto no dúctiles con disipadores de energía

Niveles	α	K_2	β	μ
5	0.25	0.00	0.5 - 1.0	10-6
		0.03	0.5 - 1.0	10-8
		0.05	0.5 - 1.0	10-8
10	0.25	0.00	0.5 - 1.0	8-6
		0.03	0.5 - 1.0	12-8
		0.05	0.5 - 1.0	12-8
15	0.25	0.00	0.5 - 1.0	<6
		0.03	0.5 - 1.0	12-8
		0.05	0.5 - 1.0	12-8
20	0.50	0.00	0.5 - 1.0	10-8
		0.03	0.5 - 1.0	12-8
		0.05	0.5 - 1.0	12-8
25	0.50	0.00	0.5 - 1.0	10-6
		0.03	0.5 - 1.0	12-8
		0.05	0.5 - 1.0	12-8

Tabla 4.13. Parámetros estructurales recomendados para marcos de concreto no dúctiles con detallado por confinamiento dúctil en vigas y columnas y con disipadores de energía

Niveles	α	K_2	β	μ
5	0.25	0.05	0.5 - 1.0	10-8
	0.50		0.5 - 1.0	10-6
	0.75		0.5 - 1.0	12-8
10	0.25	0.05	0.5 - 1.0	12-8
	0.50		0.5 - 1.0	10-8
	0.75		0.5 - 1.0	10-8
15	0.25	0.05	0.5 - 1.0	12-8
	0.50		0.5 - 1.0	12-8
	0.75		0.5 - 1.0	12-8
20	0.25	0.05	0.5 - 1.0	12-8
	0.50		0.5 - 1.0	12-8
	0.75		0.5 - 1.0	12-8
25	0.25	0.05	0.5 - 1.0	12-6
	0.50		0.5 - 1.0	12-8
	0.75		0.5 - 1.0	12-10

Si se compara la información provista en las tablas 4.12 y 4.13, se aprecia que con el uso del detallado dúctil en vigas y columnas amplía el número de combinaciones posibles donde el sistema del marco tiene menor participación no lineal dentro del sistema estructural global. Para los modelos esbeltos con un balance de $\alpha=0.25$, los disipadores de energía proporcionan mayor ductilidad al sistema global, pero repercute en la participación no lineal de algunas columnas, sobre todo en los entrepisos donde los disipadores alcanzan su ductilidad local máxima (figura 4.22a y 4.23a).

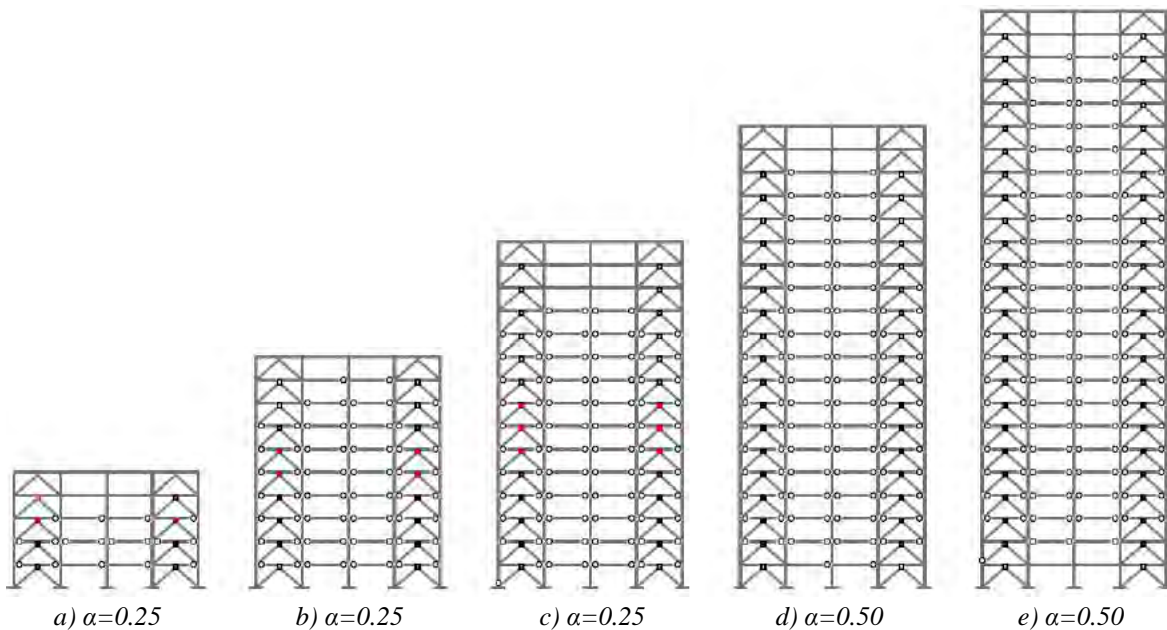


Figura 4.24. Mapeos de fluencia a la ductilidad objetivo de los disipadores μ_d para los modelos con detallado por confinamiento dúctil para balances óptimos de rigidez α cuando $\beta=0.50$

En la figura 4.24 se presenta el mapeo de fluencias de los modelos que presentaron un mejor desempeño estructural cuando se les provee de un confinamiento dúctil en vigas y columnas, tomando en cuenta:

- a) La ductilidad que desarrollan los disipadores en cada uno de los niveles (μ_d)
- b) La ductilidad global desarrollada por el sistema estructural global (Q)
- c) La magnitud de las fluencias inelásticas de los elementos de concreto reforzado

Se aprecia que para los balances presentados en esta figura, las columnas permanecen elásticas y las vigas con una participación no lineal incipiente o apenas perceptible. Si se compara la figura 4.24 (marcos con detallado para confinamiento dúctil) con la figura 2.12 (marcos con detallado para confinamiento no dúctil), se aprecia que el adicionar requisitos mínimos de detallado por confinamiento mejoran considerablemente el desempeño estructural de los marcos de concreto con disipadores de energía por histéresis del material.

4.5 Propiedades dinámicas de marcos con disipadores de energía

En la tabla 4.14 se resumen las propiedades dinámicas (periodos asociados al primer modo de vibrar y participación modal), de los marcos de concreto reforzado con disipadores de energía, para las distintas combinaciones entre los balances de rigidez de los sistemas. Se aprecia de ésta que el factor de participación modal asociado al primer modo varía conforme el modelo se hace más esbelto. Para los modelos más pequeños (cinco niveles), el factor de participación para el modo fundamental es mayor al 75%. Para los modelos de 10, 15 y 20 niveles, su participación modal varía entre el 60% al 70%. Para los modelos más esbeltos (25 niveles), la participación del modo natural, en promedio, se encuentra en un 55%. De manera

general se aprecia que conforme aumenta el número de niveles o su relación de esbeltez es mayor, el porcentaje de participación modal para el modo fundamental disminuye. Además, el cambio del parámetro β , no influyó de manera significativa en el cálculo del periodo fundamental de los marcos con disipadores. Por último, si se observa la sumatoria de los factores de participación modal de los primeros tres modos de vibrar, ésta es mayor al 85% para la gran mayoría de los casos.

En la figura 4.25 se presenta una gráfica de los periodos fundamentales de los modelos evaluados en función de la relación de esbeltez de éstos. Se observa de esta figura que conforme aumenta la relación de esbeltez de los modelos, su periodo fundamental aumenta también. Evaluando la variación del balance de rigidez entre el sistema del marco y el sistema del contraviento-disipador (α), se aprecia que para los modelos más esbeltos (20 y 25 entresijos), el modelo tiende a ser más rígido cuando el sistema contraviento – disipador aporta mayor rigidez al sistema global. Por el contrario, para los modelos de 5, 10 y 15 niveles, el modelo tiende a ser más rígido cuando el sistema del marco aporta mayor rigidez al sistema completo, sin importar el balance β utilizado.

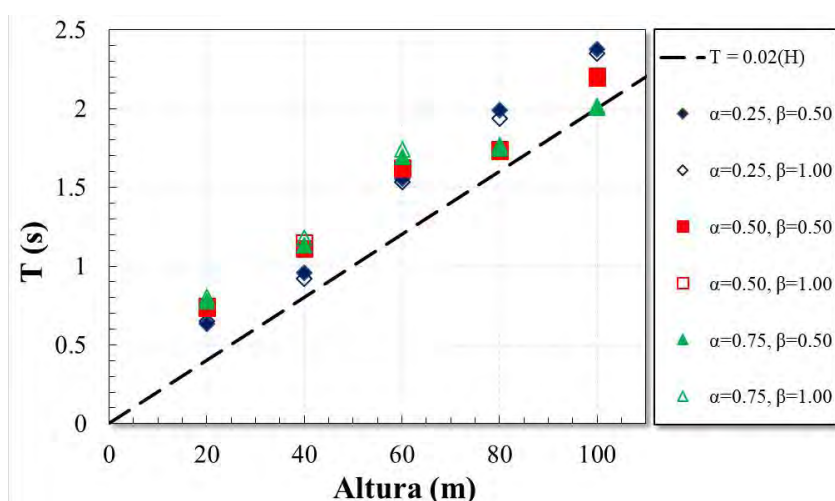


Figura 4.25. Propuesta del cálculo aproximado del periodo fundamental de vibración de marcos con disipadores histeréticos de energía

Esta particularidad se observó con las curvas de capacidad global de las figuras 4.17 y 4.18, y se debe a efectos en el diseño de los sistemas por separado; es decir, mientras más alto sea el modelo evaluado y mayor la aportación de rigidez de parte del sistema contraviento – disipador (modelos de 20 y 25 niveles con $\alpha=0.25$), la descarga axial de los contravientos a las columnas será de mayor magnitud con lo que fomentará que las secciones de las columnas sean más robustas y por ende, el sistema global tienda a ser más rígido. Este efecto es menos notorio mientras la magnitud de la carga vertical sea menor, como en los casos de los modelos de cinco, 10 y 15 entresijos. Finalmente, se representa con línea discontinua la tendencia encontrada para el periodo fundamental de los modelos analizados, por lo que se propone una ecuación simple que predice de manera práctica, el periodo esperado en estructuras con disipadores de energía en función de su altura en metros:

$$T(s) = 0.02(H) \quad (4.1)$$

Tabla 4.14. Participación modal para marcos con disipadores de energía

Niveles	H/L	β	α	T (s)	Factor de Participación Modal			
					Modo 1	Modo 2	Modo 3	Σ
5	0.625	1.00	0.25	0.653	80.87%	13.62%	3.45%	97.94%
			0.50	0.737	79.59%	13.44%	4.22%	97.25%
			0.75	0.804	78.53%	13.36%	4.79%	96.68%
		0.50	0.25	0.634	79.46%	14.71%	3.62%	97.79%
			0.50	0.744	79.75%	13.32%	4.20%	97.27%
			0.75	0.779	80.19%	12.25%	4.48%	96.92%
10	1.250	1.00	0.25	0.922	62.99%	22.48%	0.00%	85.47%
			0.50	1.146	66.74%	19.91%	6.13%	92.78%
			0.75	1.178	69.18%	17.45%	6.08%	92.71%
		0.50	0.25	0.957	65.00%	22.08%	5.92%	93.00%
			0.50	1.111	66.45%	20.71%	5.64%	92.80%
			0.75	1.134	69.99%	17.46%	5.54%	92.99%
15	1.875	1.00	0.25	1.534	61.51%	22.02%	7.23%	90.76%
			0.50	1.623	65.16%	19.74%	6.63%	91.53%
			0.75	1.74	68.75%	17.35%	5.94%	92.04%
		0.50	0.25	1.555	62.10%	21.66%	7.23%	90.99%
			0.50	1.617	63.91%	20.59%	6.84%	91.34%
			0.75	1.693	65.52%	18.93%	6.83%	91.28%
20	2.500	1.00	0.25	1.729	60.09%	21.13%	7.87%	89.09%
			0.50	1.769	63.96%	19.20%	6.93%	90.09%
			0.75	1.992	66.04%	17.43%	6.28%	89.75%
		0.50	0.25	1.992	60.68%	21.02%	7.69%	89.39%
			0.50	1.741	63.31%	19.38%	7.04%	89.73%
			0.75	1.748	66.48%	17.45%	6.25%	90.18%
25	3.125	1.00	0.25	2.350	54.11%	21.24%	8.92%	84.27%
			0.50	2.195	56.92%	21.46%	8.18%	86.56%
			0.75	2.004	61.59%	18.85%	7.10%	87.54%
		0.50	0.25	2.376	53.13%	21.91%	9.13%	84.17%
			0.50	2.205	56.35%	21.17%	8.38%	85.90%
			0.75	2.017	61.59%	18.61%	7.13%	87.33%

4.6 Parámetros sísmicos propuestos

Con base en el universo de modelos evaluados, y para el futuro diseño de modelos más complejos, a continuación se proponen algunos parámetros de diseño conforme a las Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo (NTCS-04). Es importante mencionar que para obtener los parámetros que se presentan a continuación se realizó una idealización bilineal de las curvas cortante basal normalizado – distorsión de azotea, similar a la representación gráfica de la figura 3.11.

Para los valores de reducción por sobrerresistencia (R), se observa de la figura 4.26 que dicho valor es mayor para los modelos de menor altura, y que conforme va aumentando el número de niveles analizados, éste valor tiende a 1.5. Para cuestiones prácticas, se representa con línea discontinua la tendencia encontrada para los valores de sobrerresistencia de los modelos evaluados, por lo que se propone la siguiente ecuación en función de su relación de esbeltez:

$$R = \begin{cases} \frac{6}{3 + \sqrt{\frac{H}{L}}}; & \frac{H}{L} \leq 1 \\ 1.5 & \frac{H}{L} > 1 \end{cases} \quad (4.2)$$

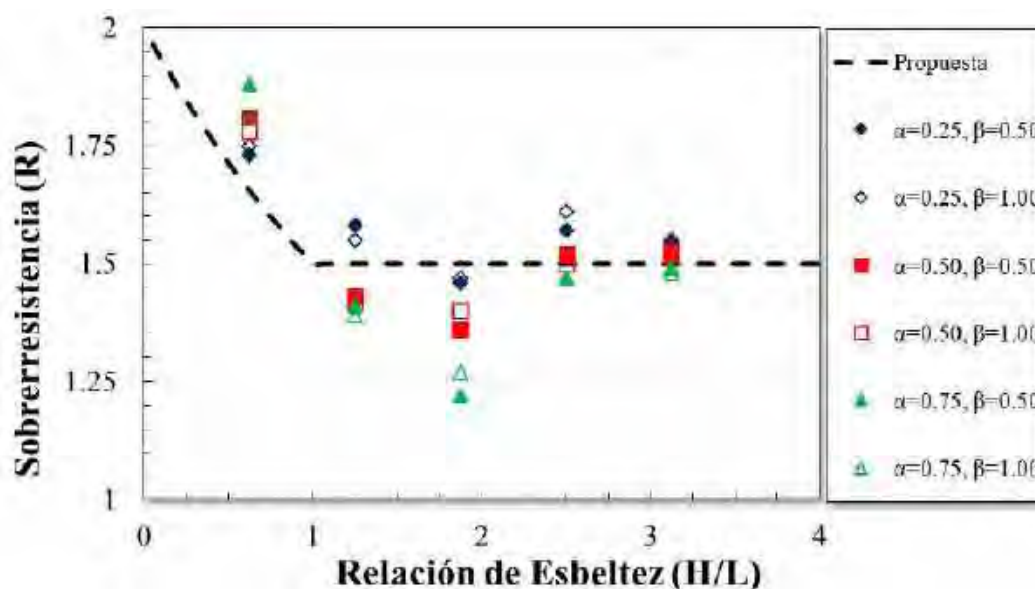


Figura 4.26. Factor de reducción por sobrerresistencia, R

En la figura 4.27 se observan los valores para el factor de comportamiento sísmico Q (o de reducción por ductilidad) que desarrolló el sistema global en los marcos evaluados. Se aprecia que conforme aumenta el número de niveles de los modelos, la ductilidad global desarrollada tiende a disminuir. Además, en esta gráfica se visualiza que usar un balance $\alpha=0.75$ tiende a desarrollar una ductilidad Q mucho menor que para los otros balances de

rigidez propuestos ($Q \approx 3.5$). Para la mayoría de los casos, se observa la tendencia que conforme se incrementa el valor de β , el valor de Q tiende a disminuir sin importar el balance α usado. Se distingue que proponer un valor de $Q=4.0$, pudiera ser razonablemente práctico para el diseño estructural de edificios con disipadores histeréticos de energía que cumplan con las condiciones de regularidad establecidas en las NTCS-04 (relación de esbeltez $H/L \leq 2.5$).

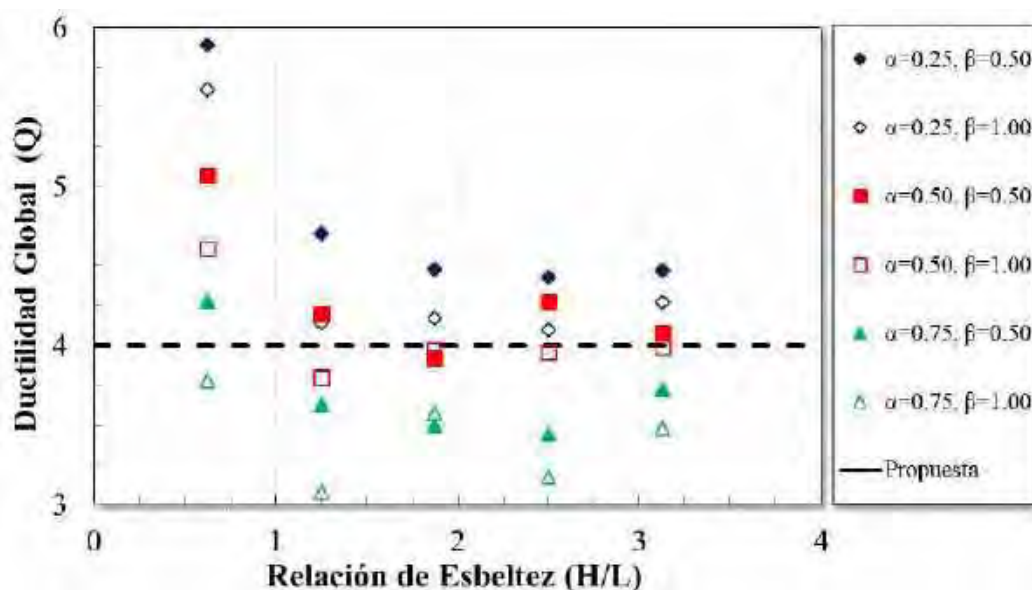


Figura 4.27. Factor de comportamiento sísmico Q

Además de proponer parámetros sísmicos para la reducción del espectro de respuesta, también se proponen valores de distorsión máximos asociados a la limitación de daños contra componentes no estructurales para sismos frecuentes (Δ_y) y para limitación de daños a los componentes estructurales del marco cuando los disipadores desarrollan su ductilidad máxima (Δ_u). En las figuras 4.28 y 4.29 se grafican los valores máximos de distorsión obtenidas de las envolventes de distorsiones del análisis estático no lineal. De manera general, se aprecia que conforme los modelos son más esbeltos el valor de distorsión tiende a aumentar. Se observa también que conforme el valor de β aumenta, el valor de la distorsión máxima desarrollada tiende a disminuir.

Como valores prácticos de distorsión asociados a Δ_y , para marcos de concreto reforzado con disipadores histeréticos de energía, se propone usar un valor de 0.003 para limitación de daño a elementos no estructurales ante sismos frecuentes; y un valor de 0.015 para limitación de daño a vigas y columnas ante el máximo sismo probable cuando los disipadores pueden alcanzar a desarrollar su ductilidad máxima (Δ_u). De la gráfica 4.28, se observa que para el modelo más esbelto cuando se utiliza $\alpha=0.25$, los valores de distorsión máxima que desarrolla el sistema global están por encima del Δ_y y del Δ_u propuesto. Con esto se busca limitar las magnitudes de rotación en vigas y columnas cuando se proponga un balance donde el sistema contraviento – disipador sea el que aporte más rigidez y resistencia al sistema completo (representativo de las figuras 4.22a y 4.23a).

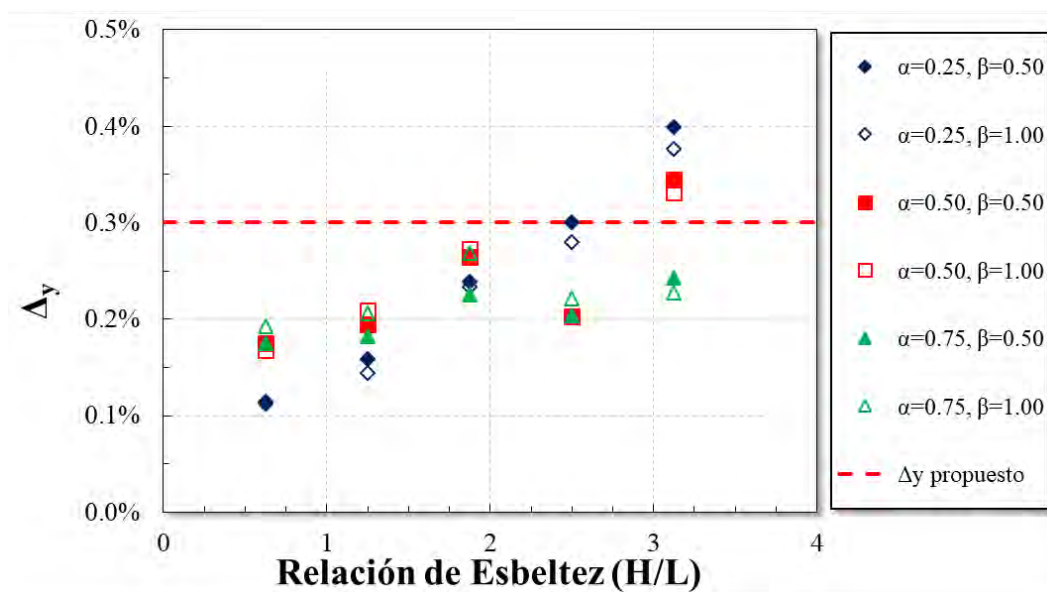


Figura 4.28. Valores máximos de distorsión asociado a Δ_y

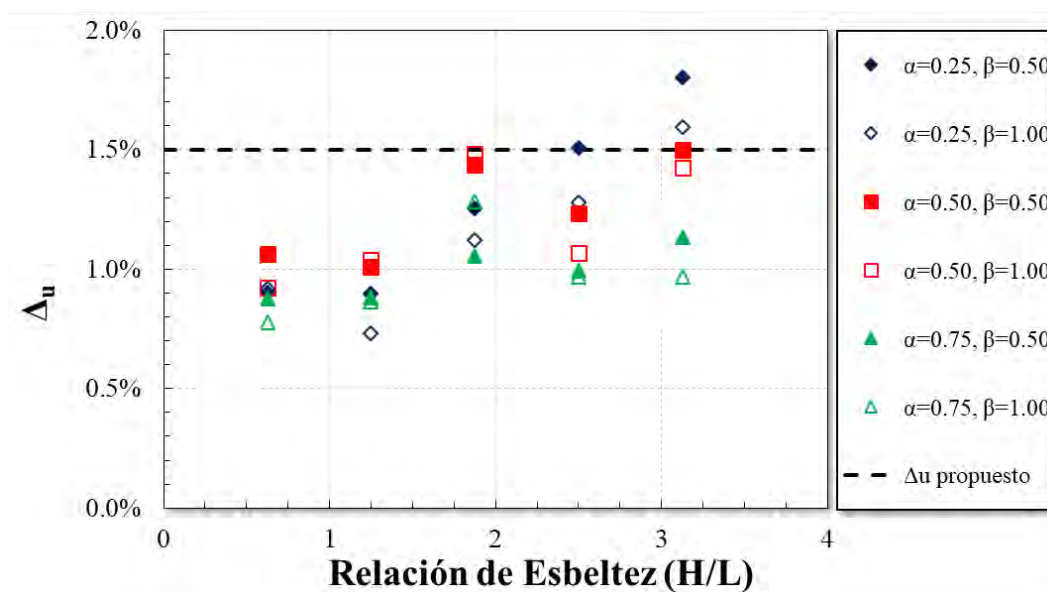


Figura 4.29. Valores máximos de distorsión asociado a Δ_u

5. COMPARATIVA DE ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA EN EL PLANO Y EN TRES DIMENSIONES

5.1 Introducción

Los ingenieros y académicos utilizan modelos matemáticos para representar las características de interés de una estructura en cuestión y de esta manera establecen los parámetros necesarios para su análisis y diseño. Con el avance tecnológico y computacional, dichos modelos matemáticos tienden a ser más complejos, debido a la incorporación de nuevos algoritmos que simulan el comportamiento de distintos tipos de materiales o elementos estructurales.

Se han realizado diversos estudios para el modelado de estructuras con disipadores histeréticos de energía; sin embargo, éstos se limitan a modelos planos de uno o múltiples grados de libertad. Por ejemplo, se han evaluado formulaciones para el modelado numérico de elementos ADAS, basados en la variación de la sección transversal del disipador a partir de idealizaciones geométricas, y se han comparado con resultados experimentales obteniendo buena correlación entre ellos (Whittaker *et al.* 1989, Tena-Colunga 1997). No obstante, existen otras propuestas sencillas, como las basadas en discretizar a los disipadores por medio de dovelas, donde cada una de ellas tiene longitud constante pero ancho variable (Aguilar *et al.* 2016).

Con el interés de evaluar la eficiencia de nuevas configuraciones o de nuevos materiales para los disipadores por histéresis, se han realizado investigaciones que constan tanto de pruebas experimentales como de estudios paramétricos; éstos últimos, con el objetivo de comprobar la eficacia de dichas propuestas. La calibración matemática entre resultados de marcos planos con dispositivos ADAS, obtenidos a partir de programas de investigación y comerciales de análisis estructural no es un tema nuevo. Dentro de este ámbito, además del estudio presentado en Tena-Colunga (1997), se encuentra la comparativa hecha por Chalco (2014) con elementos finitos elaborados en MATLAB y evaluados con dos ejemplos creados en el programa SAP2000. Chalco establece una idealización a partir de elementos finitos para el dispositivo ADAS con elementos de liga para representar su comportamiento histerético bilineal. Cada propiedad del elemento ADAS idealizado se puede atribuir a un solo desplazamiento interno, es decir, su deformación no afecta al comportamiento de otros desplazamientos internos. Por tal motivo, se aprecian diferencias en la comparación de las respuestas estructurales mientras se utilizan un mayor número de dispositivos ADAS y propone que se obtendría una mejor correlación de los resultados si se hubiese modelado a los disipadores con base en el modelo Bouc-Wen.

En el capítulo anterior se evaluó el comportamiento de marcos planos con disipadores de energía a partir de una metodología basada en balances de rigidez. Estos resultados se obtuvieron de análisis estáticos no lineales efectuados en el programa DRAIN 2DX (Prakash *et al.* 1992), modelando a los disipadores como elementos viga-columna. Los resultados de

dicho programa son altamente confiables y se han calibrado en un sinnúmero de investigaciones anteriores a ésta, pero cuenta con varias limitantes, entre ellas la ausencia de interfaces gráficas y el realizar los análisis en dos dimensiones. Además, para visualizar el desempeño de los marcos paralelos al del objeto en estudio, se tienen que hacer uso de otras técnicas de modelado. Con el objetivo de realizar modelos más complejos en 3D, que tomen en cuenta efectos ortogonales, se comparan los resultados de una serie de modelos realizados en DRAIN 2DX con el programa MIDAS Gen. Estos resultados se obtuvieron a partir de análisis estáticos no lineales y de dinámicos paso a paso.

5.2 Configuración geométrica de modelos evaluados

Se analizaron marcos planos, marcos planos acoplados y modelos tridimensionales de concreto reforzado con disipadores de energía soportados mediante un sistema de contraventeo de acero tipo chevrón. La configuración geométrica de los modelos en estudio constan de cuatro crujiás de 800 cm de claro, alturas de entrepiso de 400 cm y ángulo de inclinación de contravientos $\theta=45^\circ$; es decir, se usó la misma configuración geométrica de los modelos evaluados en el capítulo anterior. Los modelos de marcos planos acoplados tienen la misma geometría que los anteriormente descritos; se modelaron cuatro marcos en la dirección “x” con cuatro crujiás (figura 5.2) y cinco en la dirección “y” con tres crujiás (figura 5.3), acoplando cada uno de los marcos mediante vigas enlace axial e infinitamente rígidas para cada dirección en estudio, con el objetivo de visualizar el efecto de todos los marcos paralelos en cuestión para compararlo con los resultados obtenidos del modelo tridimensional de cinco niveles (Figura 5.1a).

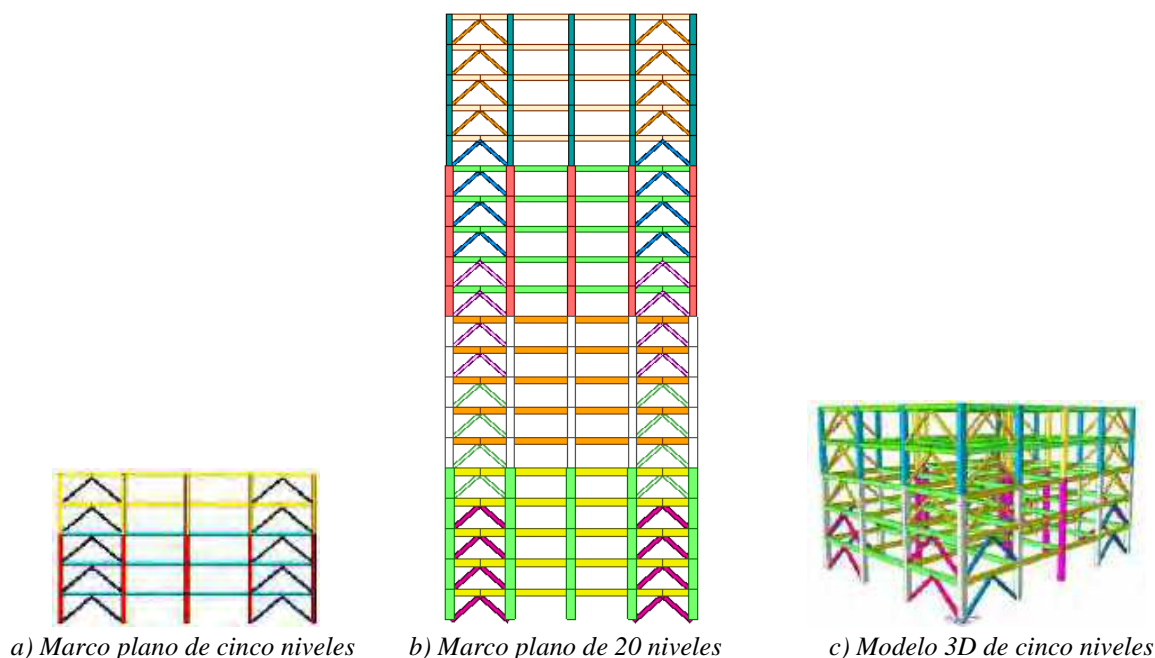


Figura 5.1. Modelos evaluados en MIDAS Gen

Los cambios de colores en las Figuras 5.1 a 5.3, representan esquemáticamente los cambios de secciones transversales conforme aumenta la altura de los modelos, sin embargo, los colores comunes en uno y otro modelo no corresponden a una misma sección (por ejemplo, las vigas amarillas del modelo de cinco niveles son distintas a las vigas amarillas del modelo de 20 niveles). En ninguno de los modelos existe cambio de secciones de vigas, columnas y contravientos en el mismo nivel de entrepiso, con el objetivo de mitigar el efecto de piso suave por el cambio abrupto de rigidez y resistencia.

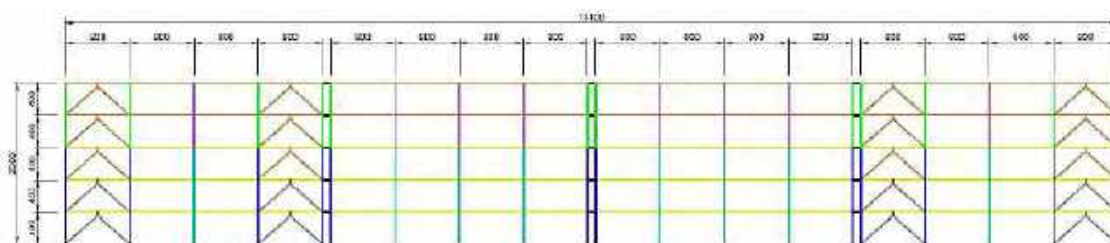


Figura 5.2. Modelo de marcos acoplados dirección "x" (unidades:cms)

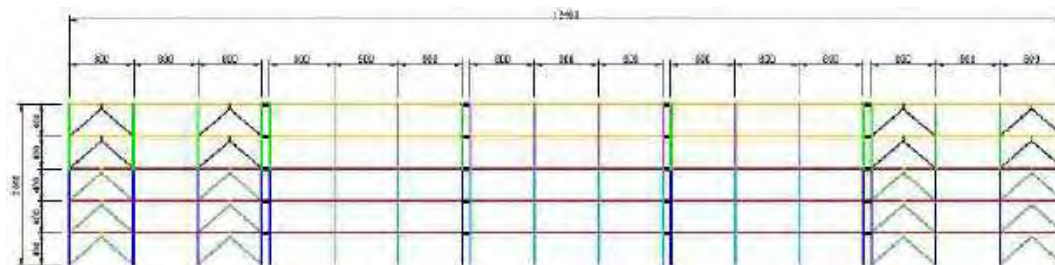


Figura 5.3. Modelo de marcos acoplados dirección "x" (unidades:cms)

5.3 Configuración de modelado de los disipadores

Para la comparación de resultados, usando dos programas distintos de análisis estructural, se modelaron a los elementos estructurales siguiendo la misma hipótesis de comportamiento para cada sistema estructural. Los elementos de contraventeo se modelaron para que trabajasen exclusivamente en dirección axial. Vigas y columnas se modelaron tomando en cuenta efectos de rigidez para tensión/compresión, cortantes y momentos flexionantes.

El modelado de los disipadores de energía se puede hacer de diversas maneras dependiendo del programa de análisis no lineal utilizado y de los elementos disponibles en sus librerías (Tena 2000). Conforme los programas de análisis estructural han ido evolucionando, dichos elementos disponibles se han ampliado con el paso del tiempo. Por ejemplo, era común a principios de los años noventa modelar los disipadores de manera simplificada con elementos axiales equivalentes, modelado que para un montado en contraventeo chevrón es razonable, ya que los elementos equivalentes trabajan en la misma dirección que lo hacen los dispositivos; aunque, se obtienen imprecisiones debido a la interacción artificial que se establece entre los nudos superiores de los marcos de cada entrepiso con los disipadores, lo que en realidad no sucede al estar los disipadores conectados exclusivamente en la parte intermedia de las vigas (Tena 2000).

Otra manera para modelar disipadores de energía son con elementos tipo liga (“*link*”) de cero longitud que se discretizan en un nodo; éstos se han utilizado, por ejemplo por Christopoulos y Filiatrault (2006). La ventaja principal es su sencillez de aplicación, sin embargo, la desventaja en un montado con contravientos chevrón es que no modela la longitud real de los disipadores. Generalmente se consideran que sólo trabajan a cortante (se desprecia la flexión y la carga axial, o si se consideran, están totalmente desacopladas por ser modelados por medio de resortes), y no se considera la rotación que pueden experimentar éstos en su apoyo inferior con el sistema de contravientos, lo cual modifica el ángulo real de inclinación de éstos (que ya se ha demostrado que impactan a la respuesta real del marco) y, por ello, se tienen imprecisiones que no han sido cuantificadas ni reportadas, inclusive para los elementos mecánicos de los contravientos y de las vigas que se conectan directamente con los disipadores.

Siempre ha existido la posibilidad de modelar con mayor rigor a los disipadores (Tena 2000), utilizando elementos tipo viga-columna (“*beam-column*”) que permiten considerar su longitud, ubicación y condiciones de continuidad con mayor exactitud, así como considerar que pueden trabajar a cortante, flexión y axialmente al mismo tiempo. El esfuerzo adicional para hacerlo no es muy grande, es incluir los nodos extras requeridos para modelar con precisión la geometría del disipador, y los resultados que se obtienen se correlacionan muy bien con los que se han reportado en experimentos que se han hecho en mesa vibradora (Tena-Colunga 1997). Sin embargo, es un hecho que la popularidad de los elementos tipo liga para modelar disipadores ha aumentado en años recientes.

De esta manera, los disipadores de energía se modelaron de dos maneras distintas; como elementos tipo viga-columna, la cual tiene su formulación basada en la teoría de vigas de Timoshenko (Figura 5.4a). La segunda, como elementos tipo liga, los cuáles son resortes que individualmente representan una deformación axial, dos deformaciones por cortante, una deformación por torsión y dos deformaciones por flexión (Figura 5.4b). En MIDAS Gen, dependiendo del método de aplicación del análisis, puede ser del tipo elemento o del tipo fuerza. Los elementos de liga del tipo elemento reflejan directamente el comportamiento no lineal del elemento restableciendo la matriz de rigidez (análisis estáticos no lineales). Cuando se utilizan los elementos de liga del tipo fuerza (análisis dinámicos paso a paso), éstos reflejan la no linealidad de manera indirecta convirtiendo las fuerzas de los elementos, calculadas a partir de las propiedades no lineales, a fuerzas externas (MIDAS 2014).

Otra diferencia importante del modelado entre los programas utilizados radica en el punto de inserción geométrico de los elementos del marco, principalmente de las vigas. Mientras que en DRAIN-2DX este punto de inserción viene definido de manera predeterminada y se puede ajustar con la ubicación de las zonas rígidas en los extremos de las columnas; en MIDAS Gen, se puede elegir directamente entre insertar la viga en el centroide geométrico de la sección (figura 5.5a) o en el punto superior medio para alinearla con la altura del entrepiso (figura 5.5b).

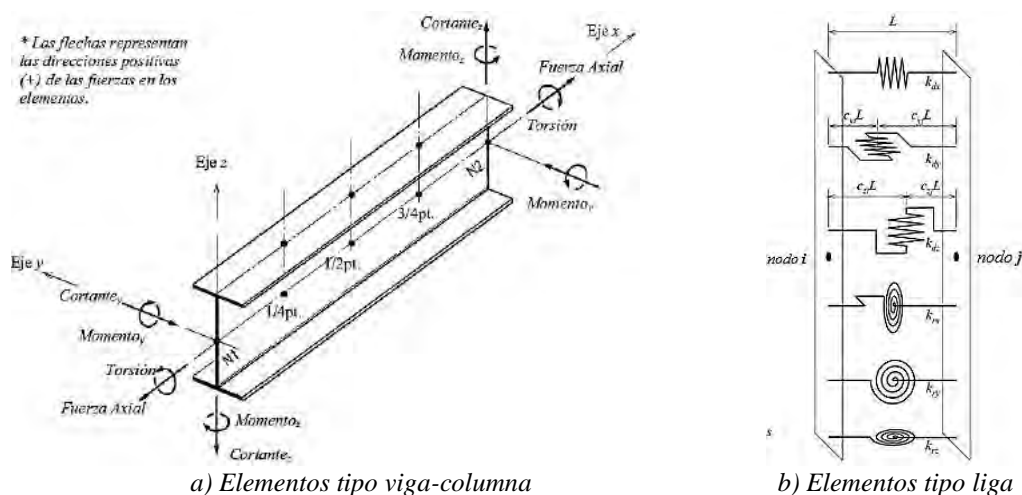


Figura 5.4. Modelado de elementos estructurales en MIDAS Gen (adaptado de Midas 2014)

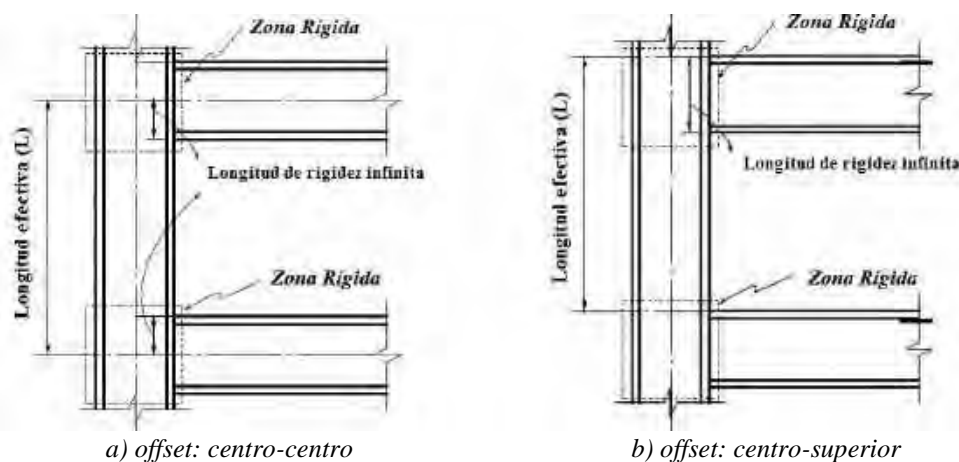


Figura 5.5. Modelado de zonas rígidas en Midas Gen (adaptado de Midas 2014)

Como primera instancia, se evaluaron cinco versiones del modelo de marco plano de cinco niveles; cuatro de éstas se modelaron en MIDAS Gen en función de dos parámetros; el primero, la forma de modelar el disipador (elementos viga-columna o elementos de tipo liga); la segunda, la variación del punto de inserción de las vigas. Para todos los modelos las condiciones de apoyo para las columnas del primer nivel son empotradas y se agregó una condición de frontera a giro en el extremo inferior de todos los disipadores.

La finalidad de la evaluación de los marcos planos de cinco niveles fue valorar la divergencia de resultados relacionados al modelado entre ambos programas. En los marcos planos de 20 niveles se aprecian las diferencias en el modelado del disipador para los dos tipos de análisis efectuados en este trabajo (estático no lineal y dinámico no lineal paso a paso). Finalmente, y con base en la comparativa de los resultados de marcos planos, se evalúa el impacto de la rigidez del nudo viga-columna en la rigidez global a partir de las diferencias observadas entre los marcos planos acoplados y el modelo tridimensional llevados a cabo en DRAIN-2DX y MIDAS Gen respectivamente.

Las siglas utilizadas para los modelos hacen referencia al número de niveles usados (M5), al tipo de elemento usado para los disipadores (B para elementos viga-columna y L para elementos de tipo liga), y al punto de inserción de las vigas en el modelo (C para el centroide y T para la parte superior de la sección transversal). A manera de ejemplo, el modelo M5BC representa al marco de cinco niveles, con disipadores modelados con elementos viga-columna y las vigas colocadas en el centroide de la sección transversal.

Los modelos evaluados en el presente trabajo se diseñaron con base en relaciones de rigidez entre el sistema del marco y el sistema contraviento-disipador (α) y entre el contraviento y el disipador (β). Además de cuidar que se cumplieran los balances de rigidez antes mencionados, se revisaron que todos los elementos cumplieran con las demandas de resistencia impuestas en el proceso de prediseño (Tena y Nangullasmú 2013). Los elementos de concreto reforzado se diseñaron acorde a los requisitos de marcos no dúctiles de las Normas Técnicas Complementarias (NTCC-04), añadiendo al proceso de diseño los requisitos de confinamiento dúctil referidas a las secciones 7.2.3 y 7.3.4, relacionadas principalmente a la separación de estribos en vigas y columnas respectivamente.

Se presenta en la Tabla 5.1 las secciones utilizadas para cada uno de los sistemas involucrados para los modelos de cinco niveles (figuras 5.1a, 5.1c, 5.2 y 5.3). Los balances de rigidez indican que el sistema del marco es más flexible que el sistema estructural global ($\alpha=0.25$), y que el disipador tiene la mitad de rigidez que el contraviento ($\beta=0.50$). De manera esquemática, en la figura 5.6 se aprecian los armados longitudinales y transversales de las secciones de concreto. El diámetro de los estribos utilizados se distinguen con colores diferentes; rojo, para estribos No. 2.5 (diámetro de 5/16" o 7.9 mm); azul, para estribos No. 3 (diámetro de 3/8" o 9.5 mm); verde, para estribos No. 4 (diámetro de 1/2" o 12.7 mm).

Tabla 5.1. Modelo de 5 niveles, $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$ (unidades: t-cm)

Vigas	Entrepiso	b	h	Lecho Superior	Lecho Inferior	Est. Extremo	Est. Centro
	V1x 1-3	35	55	6 Vs No.6	4 Vs No. 6	4 No. 2.5 @ 10	4 No. 2.5 @ 15
	V2x 4-5	30	50	5 Vs No.6	4 Vs No. 6	3 No. 2.5 @ 10	4 No. 2.5 @ 15
	V1y 1-3	35	55	7Vs No.6 + 4Vs No.5	6Vs No.6 + 2Vs No.5	4 No. 2.5 @ 10	4 No. 2.5 @ 15
	V2y 4-5	30	50	6Vs No.6 + 5Vs No.5	6Vs No.6 + 2Vs No.5	4 No. 2.5 @ 10	4 No. 2.5 @ 15
Columna	Entrepiso	b	h	Refuerzo Long.	Cuantía	Est. Extremo	Est. Centro
	C1 Ext 1-3	60	60	48 Vs No. 6	3.80%	7 No. 3 @ 10	7 No. 3 @ 15
	C2 Ext 4-5	55	55	40 Vs No. 6	3.77%	6 No. 3 @ 10	6 No. 3 @ 15
	C1 Int 1-3	60	60	20 Vs No. 6	1.58%	4 No. 3 @ 8	4 No. 3 @ 15
	C2 Int 4-5	55	55	16 Vs No. 6	1.51%	3 No. 4 @ 10	3 No. 4 @ 15
Contraviento	Entrepiso	b	h	t			
	CV1x 1-2	30.48	30.48	1.91			
	CV2x 3-5	25.4	25.4	1.91			
	CV1y 1-2	30.48	30.48	1.59			
	CV2y 3-5	25.4	25.4	1.27			
Disipador	Entrepiso	F _y	K ₂	K _{ELÁSTICA}			
	D1x 1-2	65.41	0.05	251.34			
	D2x 3-5	51.77	0.05	206.66			
	D1y 1-2	65.41	0.05	211.78			
	D2y 3-5	51.77	0.05	141.50			

Se aprecian de la tabla y figura antes mencionadas, que para vigas y columnas las secciones transversales variaron conforme a la altura de los modelos. Además, se decidió hacer diferencias en el armado longitudinal para las vigas acorde a la dirección de análisis, y en las columnas se reforzaron en mayor medida aquéllas dónde se descargaba la componente axial de los contravientos (marcos perimetrales). Como se aprecia de las figuras 5.2 y 5.3, la rigidez de los marcos de concreto es diferente para cada dirección de análisis, principalmente por el número de crujías que presentan cada uno. Por tal motivo, se decidió controlar los balances de rigidez a partir del espesor de los contravientos de acero utilizados y de la rigidez elástica de los disipadores, con el objetivo de satisfacer de manera práctica los balances “ α ” y “ β ” propuestos.

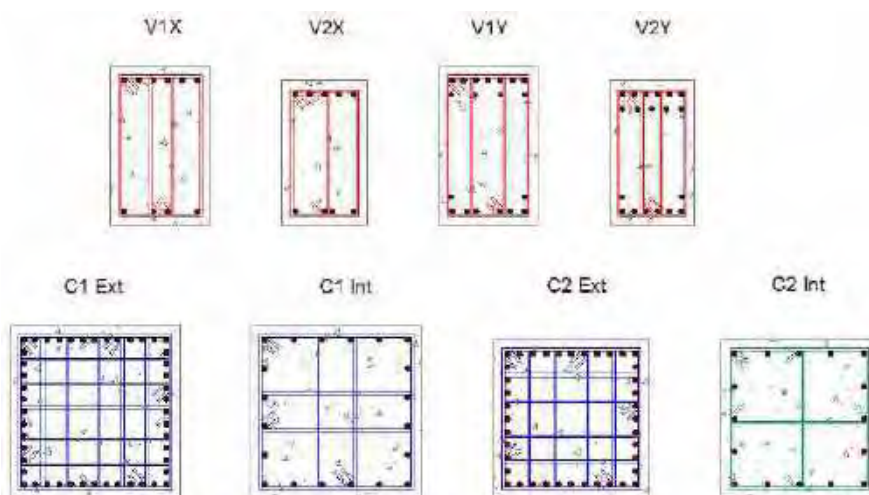


Figura 5.6. Armado de vigas y columnas para el modelo de 5 niveles con $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$

5.4 Discretización de datos para los análisis no lineales

El programa MIDAS Gen cuenta con dos modalidades para la introducción de los diagramas momento-rotación y de los diagramas de interacción, ambos indispensables para los análisis estáticos no lineales. El primero de ellos, es la forma automática a partir del armado propuesto por el usuario en las secciones de concreto utilizadas (por ejemplo, figura 5.6). La segunda es introduciendo de manera manual los datos para crear los diagramas antes mencionados, uno por cada tipo de sección a considerar. En la Figura 5.7 se presentan los diagramas momento-rotación obtenido a partir del cálculo automático en MIDAS Gen (línea continua), y los calculados de manera externa (BIAX). Se aprecia de ésta, que MIDAS Gen no cuenta aún con una herramienta necesaria para el cálculo de los diagramas que tome en cuenta el confinamiento del concreto, causado por la separación de los estribos.

Para cada una de los modelos antes mencionados, se introdujeron de manera manual los datos de los diagramas momento-curvatura y de los diagramas de interacción calculados previamente con el programa BIAX (Wallace y Moehle 1989), con el objetivo de considerar el confinamiento del concreto reforzado y obtener una mejor correlación entre los resultados

de ambos programas. La manera de introducir los parámetros requeridos para el análisis es sustancialmente diferente para cada uno de los programas utilizados; mientras DRAIN-2DX requiere de un formato de texto, MIDAS Gen cuenta con una interfaz gráfica la cual permite una visualización previa de los datos introducidos.

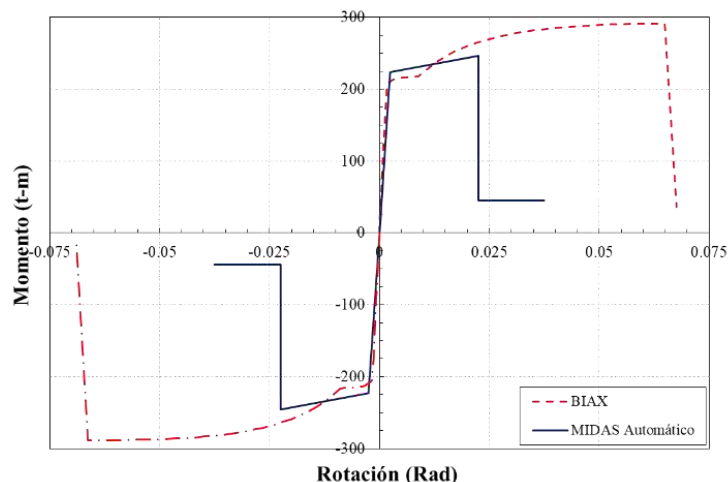


Figura 5.7. Diagrama momento-rotación para vigas

Para los diagramas de momento-rotación se realizó una idealización bilineal (figura 5.8), asegurando que la cantidad de energía entre el diagrama obtenido por el programa BIAX fuera equivalente al del idealizado. Ambos programas necesitan el momento de fluencia del elemento y su pendiente post-fluencia. La diferencia principal radica en que DRAIN-2DX no delimita el momento último que resiste el elemento, mientras que en MIDAS Gen se puede plantear dicho momento. De esta manera, MIDAS Gen determina el punto de quiebre de la curva de capacidad del sistema global y, con ello, el punto último del análisis donde la estructura se vuelve inestable.

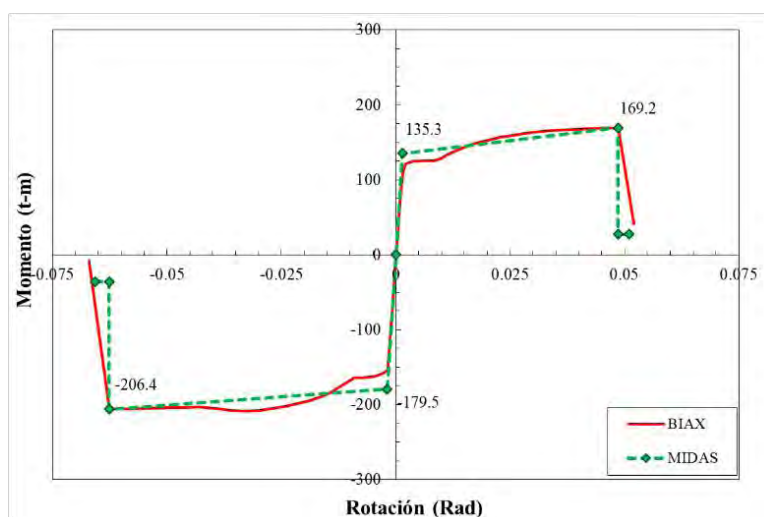


Figura 5.8. Idealización del diagrama momento-rotación para viga

Para los diagramas de momento-rotación; en DRAIN-2DX, se hacen idealizaciones entre los puntos de la falla balanceada y los de compresión axial pura y momento en ausencia de carga axial (línea roja). Por otro lado, en MIDAS Gen se permite la introducción de un mayor número de datos del diagrama de interacción, obteniendo un suavizado del diagrama que se asemeja con mayor precisión al del calculado con BIAx (figura 5.9).

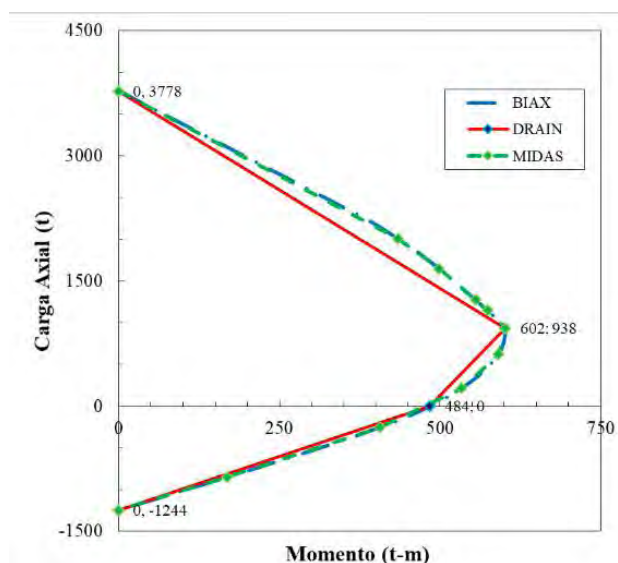


Figura 5.9. Idealización del diagrama de interacción momento-carga axial para columna

5.5 Resultados de análisis estáticos no lineales

Con base en análisis estáticos no lineales bajo cargas laterales monótonas crecientes, efectuados con el programa DRAIN-2DX y MIDAS Gen, se presentan resultados característicos para los diversos modelos evaluados. Se presentan comparativas entre mapeo de fluencias y curvas de cortante basal normalizado – distorsión global de azotea. Además, se reportan en tablas las diferencias en los parámetros sísmicos de diseño obtenidas a partir de las curvas mencionadas con los diferentes parámetros de modelado tomados en cuenta.

5.5.1 Marcos planos de cinco niveles

Con el objetivo de evaluar las distintas formas de modelado de los disipadores en MIDAS Gen y de observar la posible divergencia de resultados ocasionado por el punto de inserción de las vigas, se evalúan en primera instancia marcos planos de cinco niveles con las características de la figura 5.1a. Para los modelos en MIDAS Gen donde se utilizaron elementos liga, éstos se pueden identificar con las siglas M5LC y M5LT. En la figura 5.10 se presentan las curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea, de la cual, con línea sólida roja, se indican los resultados obtenidos con el programa DRAIN-2DX; con líneas formadas por guiones, los obtenidos para marcos con disipadores modelados con elementos viga-columna (M5BC y M5BT); y con líneas formadas por guiones y puntos, los calculados para marcos con disipadores modelados con elementos liga.

De los resultados mostrados en la figura 5.10, y como era de esperarse, se aprecia que el modelar a los disipadores con elementos viga-columna en MIDAS Gen hace que la rigidez elástica del modelo global coincida exactamente con los resultados obtenidos por el DRAIN 2DX, puesto que se empleó el mismo principio de modelado para los disipadores entre ambos programas. Sin embargo, se observa una variación perceptible en el intervalo no lineal, sobre todo, si se evalúa el cambiar el punto de inserción de las vigas en MIDAS Gen, obteniendo mayor magnitud de sobrerresistencia cuando se modela a la viga para que coincida con la altura de entrepiso (M5BT y M5LT), sin importar el tipo de elemento que se utilice para modelar a los disipadores. Por otro lado, modelar a los disipadores con elementos liga en MIDAS Gen, hace ligeramente más rígida a la estructura global, debido a que no se modela la rotación que experimenta el disipador con respecto al contraviento de soporte.

Las diferencias en los resultados debido al cambio en el punto de inserción de las vigas, tienen su fundamento en la forma de modelar las zonas rígidas en MIDAS Gen. La longitud de rigidez infinita en las columnas varía según el punto de inserción, es decir, existen diferencias si hace coincidir el nivel de entrepiso con la parte superior de la viga o con el centroide geométrico de ésta (figura 5.5a). Cuando se toma en cuenta la primera suposición, la magnitud de la longitud de rigidez infinita se calcula en el extremo superior de la columna (figura 5.5b). Si se toma en cuenta la segunda hipótesis, la longitud de rigidez infinita se calcula para ambos extremos de la misma. Además, al variar dicho punto de inserción, se modifica en automático la rigidez del elemento y la distribución de carga, es decir, se crea una pequeña excentricidad, lo que genera fuerzas cortantes y momentos flexionantes adicionales. Esta variación no afecta en el cálculo de deformaciones axiales o torsionales (MIDAS 2014).

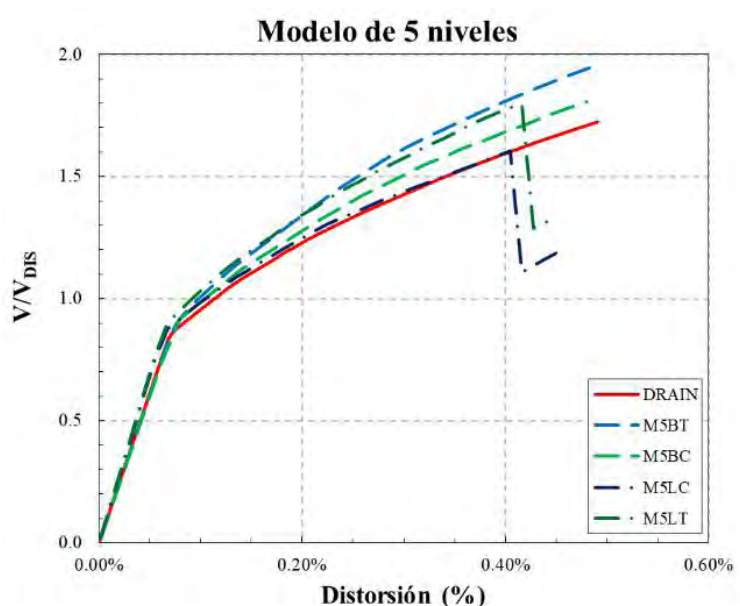


Figura 5.10. Curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea con $\alpha=0.25$, $\beta=0.50$

Evaluando los parámetros sísmicos de ductilidad (Q) y sobrerresistencia (R) reportados en la tabla 5.2, los cuales se obtuvieron a partir de cada una de las curvas mostradas en la figura 5.10, se comparan los diferentes resultados para cada programa en cuestión. Se aprecia que el modelar los disipadores bajo las mismas características entre los dos programas (elementos viga-columna), las diferencias no son mayores al 7% (sombreados en gris). Inclusive, para los modelos donde se presentaba una diferencia en la rigidez elástica por modelar a los disipadores de energía con elementos liga, las discrepancias de resultados no fueron mayores al 8%. El modelo que presentó mayor variación con respecto a los otros fue el M5BT modelado en MIDAS Gen. El uso de elementos viga-columna, aunado con alinear la viga con la altura de entrepiso, permitió al modelo desarrollar un mayor nivel de sobrerresistencia de más del 14%, comparándolo con el modelo elaborado en el DRAIN-2DX.

Tabla 5.2. Comparativa de resultados entre DRAIN-2DX y MIDAS Gen, marcos planos 5 niveles

PROGRAMA	MODELOS	RESULTADOS			% PORCENTAJES		
		Q	R	T (s)	Q	R	T(s)
DRAIN-2DX	M5BC	5.89	1.73	0.634			
	M5BT	5.62	1.97	0.632	95.3%	114.1%	99.7%
MIDAS	M5BC	5.62	1.83	0.633	95.3%	106.2%	99.8%
	M5LT	5.48	1.80	0.591	92.9%	103.9%	93.2%
	M5LC	5.55	1.61	0.598	94.1%	92.9%	94.3%

5.5.2 Marcos planos de 20 niveles

Con base en los resultados evaluados para los modelos descritos de los marcos planos de cinco niveles, se calibró el modelo de 20 niveles con balances de rigidez $\alpha=0.25$ y $\beta=0.50$ representativo de la figura 5.1b. Se decidió utilizar dicho modelo debido a que cuenta con un periodo cercano a 2 segundos ($T=2.0$ s), con lo que estaría cercano al periodo dominante de la zona para el cual fue diseñado (zona lacustre de la Ciudad de México), y de esta manera, aprovechar el mismo para los análisis dinámicos paso a paso y hacer la comparativa de los ciclos de histéresis de los disipadores obtenidos con DRAIN-2DX y MIDAS Gen, que se presentan y discuten más adelante.

En la figura 5.11 se grafican las curvas de cortante basal normalizado vs distorsión global de azotea de los resultados obtenidos con el programa DRAIN-2DX (línea continua) y los modelados con MIDAS Gen (línea discontinua). Se aprecia de ésta, que existen diferencias en la rigidez elástica de las curvas, directamente relacionada por la forma de modelar a los disipadores de energía. Para la figura antes mencionada, los modelos realizados en MIDAS Gen se usaron elementos liga para simular la participación de los disipadores dado que, como se aprecia de la tabla 5.2, las discrepancias de resultados no afectarían de manera práctica en la obtención de parámetros sísmicos de diseño. Como se observa de la tabla 5.3, las mayores diferencias se presentan en la obtención del parámetro Q cuando se usa como punto de inserción de la viga el centroide geométrico de la misma. Por otra parte, cuando se alinea la viga con la altura de entrepiso la mayor diferencia se presenta al obtener el parámetro R.

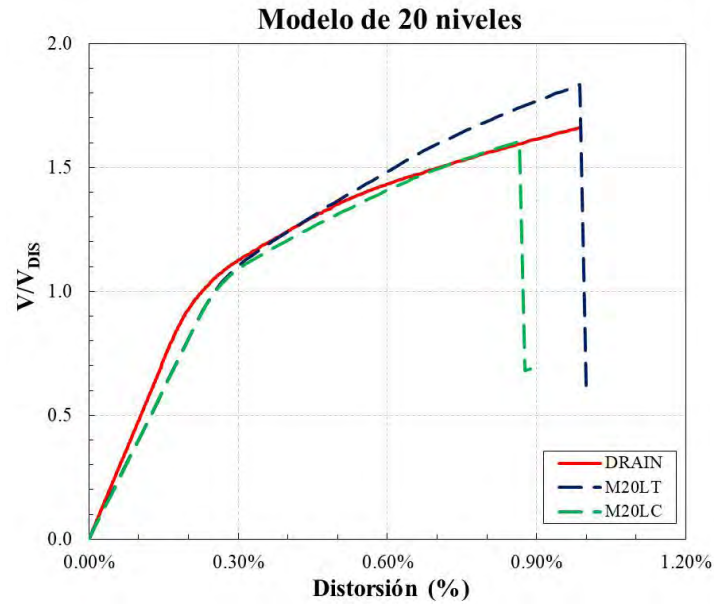
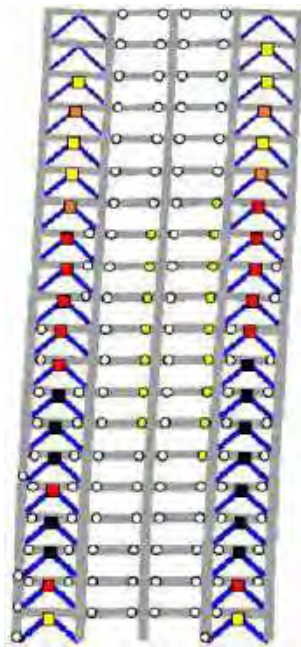


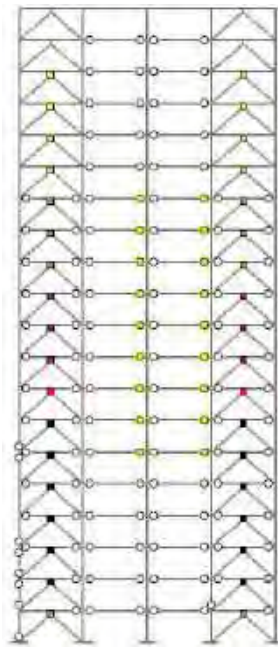
Figura 5.11. Curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea con $\beta=0.50$, $\alpha=0.25$

Tabla 5.3. Comparativa de resultados entre DRAIN-2DX y MIDAS Gen, marco plano de 20 niveles

PROGRAMA	MODELOS	RESULTADOS OBTENIDOS			% PORCENTAJES		
		Q	R	T (s)	Q	R	T (s)
DRAIN-2DX	M20BC	3.95	1.66	1.992			
MIDAS	M20LC	3.29	1.61	1.866	83.3%	96.6%	93.7%
	M20LT	3.62	1.83	1.864	91.6%	110.3%	93.6%



a) Post-proceso de MIDAS Gen



b) Post-proceso de DRAIN 2DX

Figura 5.12. Mapeo de fluencias inelásticas para marco plano de 20 niveles con $\beta=0.50$, $\alpha=0.25$

En la figura 5.12 se presenta el mapeo de fluencias inelásticas para el marco plano de 20 niveles obtenidas con MIDAS Gen y DRAIN 2DX. Comparando la magnitud de las ductilidades desarrolladas por los disipadores con MIDAS Gen (Figura 5.12a), contra las obtenidas de los resultados del DRAIN-2DX (Figura 5.12b), son bastante similares refiriéndonos al código de colores, con excepción de los primeros dos niveles del marco evaluado. Para el código de colores de las fluencias inelásticas en vigas y columnas, se aprecia que en ambos modelos se tiene participación no lineal incipiente para las columnas de la periferia izquierda. Por otra parte, apenas es perceptible el cambio de colores referentes a una participación no lineal mayor en vigas de los entrepisos intermedios, debido al código de colores utilizados en MIDAS Gen, donde el tono de azul más intenso representa una participación lineal elástica del elemento.

5.5.3 Marcos acoplados y modelos tridimensionales de cinco niveles

Evaluadas las diferencias de modelado en marcos planos entre MIDAS Gen y DRAIN-2DX, se realizaron modelos planos acoplados de cinco niveles para comparar sus resultados con el modelo tridimensional. Para el modelo en MIDAS Gen se utilizaron elementos liga para simular a los disipadores y se eligió la parte media superior como punto de inserción de las vigas. En DRAIN-2DX se modeló a la estructura en dos dimensiones, por lo que se tuvo que realizar dos modelos por separado para ver el efecto de los marcos acoplados en la dirección “x” (figura 5.2), y en la dirección “y” (figura 5.3). La ventaja que presenta MIDAS Gen es que se modela a la estructura en tres dimensiones en un único modelo, con lo que permite el análisis y la visualización de efectos ortogonales.

En la figura 5.13 se presentan las curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea para los modelos de cinco niveles antes mencionados. Se aprecia de ésta dos figuras, que corresponden a la dirección “x” e “y”, respectivamente. En las curvas analizadas en la dirección “x”, se aprecia además de los resultados del modelo tridimensional en MIDAS Gen y del modelo acoplado efectuado en DRAIN 2DX, una tercera curva con línea discontinua que representa la curva de capacidad con las mismas características geométricas y de resistencia, pero con la configuración estructural representativa de la figura 5.1a.

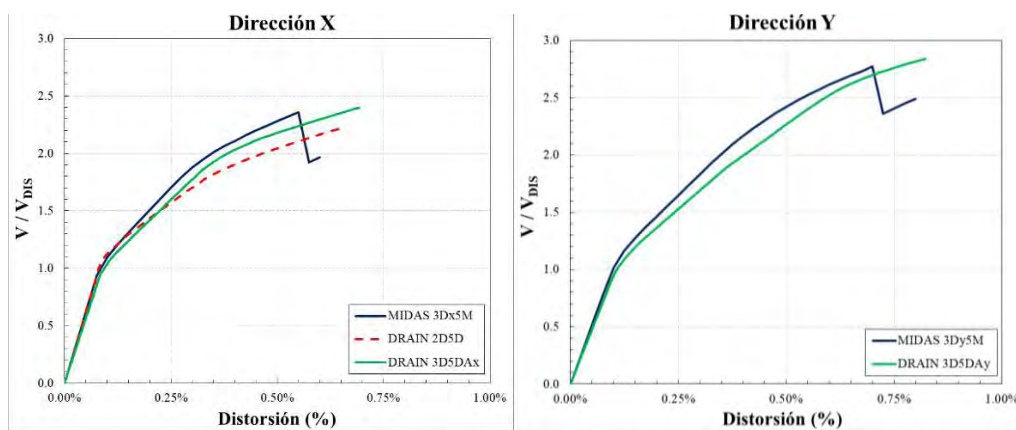


Figura 5.13. Curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea, modelo de 5 niveles

De los resultados expuestos en la figura 5.13 para ambas direcciones, se observa que existen pequeñas diferencias en la rigidez de cada una de las curvas graficadas. Como se expuso con anterioridad, esto se debe al efecto del modelado de los disipadores y, para estos modelos en particular, principalmente a la rigidez de los nudos viga-columna en una modelación tridimensional rigurosa como la hecha en Midas (modelo 3Dx5M y 3Dy5M) con respecto a la hecha en marcos planos en el DRAIN-2DX. Además, se aprecia que la distorsión última que desarrolla el conjunto de marcos acoplados analizados en DRAIN-2DX (3D5DAx) es ligeramente mayor que los resultados evaluados en MIDAS Gen.

En las tablas 5.4 y 5.5 se resumen las diferencias en la obtención de coeficientes sísmicos de diseño “Q” y “R” a partir de las curvas de capacidad de la figura 5.13, y de los periodos de vibrar de los modelos obtenidos en cada uno de los programas. Se aprecia que la diferencia entre los valores es, para efectos prácticos, despreciables en ambas direcciones. Es decir, existe buena correlación entre el modelado en tres dimensiones y el modelado acoplado en dos direcciones. La mayor diferencia entre los resultados obtenidos se encuentra en la comparativa del coeficiente sísmico de ductilidad “Q”. Se observa de la tabla 5.4 que el modelar un solo marco con disipadores trae como resultado que la ductilidad global que desarrollaría la estructura sea mucho mayor en comparación que si se toman en cuenta en el modelado los demás marcos involucrados en la misma dirección, independientemente si se modela con una técnica de acoplamiento o en un modelo riguroso tridimensional.

Tabla 5.4. Comparativa de resultados de modelos en 2D y 3D, dirección X

PROGRAMA	MODELOS	DIRECCIÓN X			% DIFERENCIAS		
		Q	R	T (s)	Q	R	T (s)
MIDAS	3Dx5M	5.24	2.36	0.636			
DRAIN-2DX	2D5D	5.71	2.23	0.639	9.1%	5.5%	0.5%
	3D5DAx	5.09	2.40	0.671	2.9%	1.8%	5.5%

Tabla 5.5. Comparativa de resultados de modelos en 2D y 3D, dirección Y

PROGRAMA	MODELOS	DIRECCIÓN Y			% DIFERENCIAS		
		Q	R	T (s)	Q	R	T (s)
MIDAS	3Dy5M	5.00	2.78	0.694			
DRAIN-2DX	2D5D	-	-	-			
	3D5DAy	5.20	2.84	0.730	4.1%	2.2%	5.3%

Las figuras 5.14 a 5.21 corresponden al mapeo de fluencias inelásticas de todos los elementos involucrados en el sistema estructural. Como se ha observado en los mapeos para los marcos planos (figura 5.12), los contravientos se mantienen elásticos durante todo el evento sísmico, dado que servirán de soporte a los disipadores y, por ende, éstos no pueden fallar en ningún momento. En la figura 5.14 se observa de manera esquemática, el mapeo de rotaciones para el modelo efectuado en MIDAS Gen. Cabe señalar nuevamente que en las gráficas de MIDAS Gen los círculos en azul marino representan respuestas elásticas (figuras 5.14).

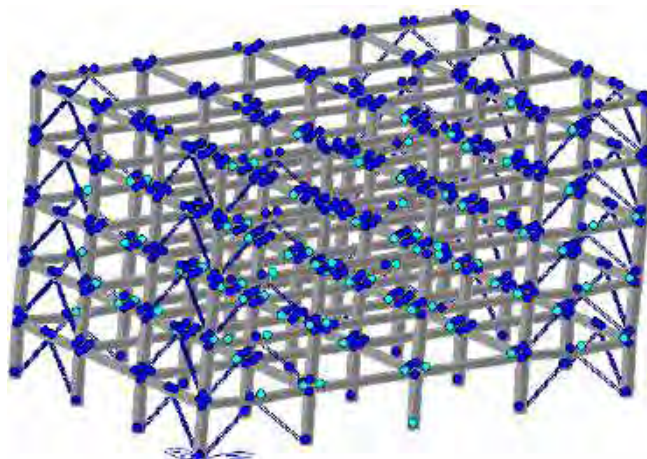


Figura 5.14. Mapeo de fluencias inelásticas de MIDAS Gen 3D para modelo de cinco niveles

Comparando las ductilidades de los disipadores obtenidas con MIDAS Gen en la dirección “x” (figura 5.15) con las obtenidas de los resultados del DRAIN-2DX (figuras 5.16 y 5.17), se aprecia una diferencia, apenas perceptible, en el código de color del disipador del cuarto entrepiso. Además, se observa que el patrón de formación de fluencias inelásticas en vigas y columnas son muy similares, y el código de color para todos los modelos es de un daño incipiente en vigas de los entrepisos uno al tres, y rotaciones en la base de las columnas interiores del primer nivel por efecto de la condición de apoyo como empotramiento perfecto.

De manera similar que para los mapeos en la dirección “x”, para la dirección ortogonal a ésta, se aprecian leves diferencias en el código de colores asociado a la ductilidad desarrollada por los disipadores del entrepiso tres (figuras 5.18 y 5.19). Por otra parte, la mayoría de las columnas presentaron comportamiento elástico, con excepción de las columnas internas del primer entrepiso de los marcos sin disipadores (figuras 5.18 y 5.19). Finalmente, las vigas de los dos últimos entrepisos en ambas direcciones de análisis, no presentaron comportamiento inelástico, con ningún programa de análisis evaluado.

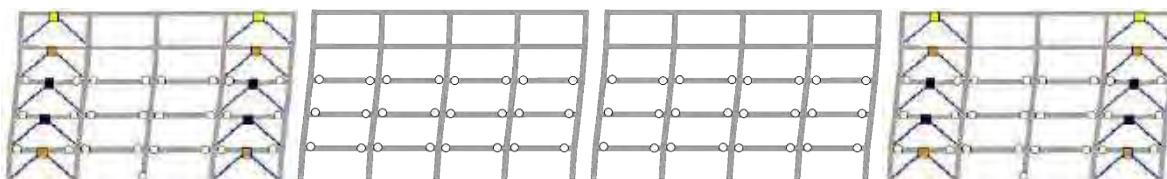


Figura 5.15. Mapeo de fluencias inelásticas MIDAS Gen para modelo de cinco niveles, dirección X

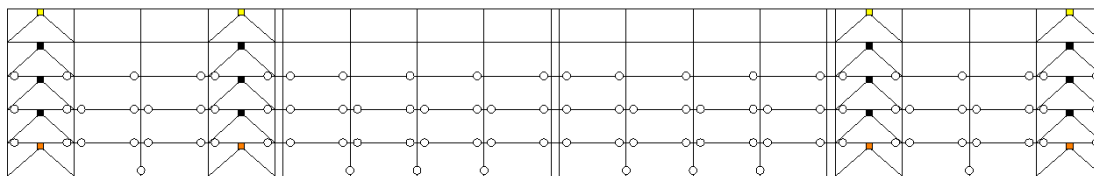


Figura 5.16. Mapeo de fluencias inelásticas DRAIN 2DX para modelo de cinco niveles, dirección X

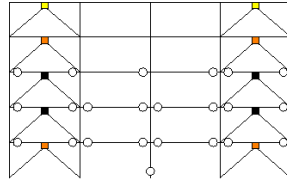


Figura 5.17. Mapeo de fluencias inelásticas DRAIN 2DX, modelo de 5 niveles sin acoplar, dirección X

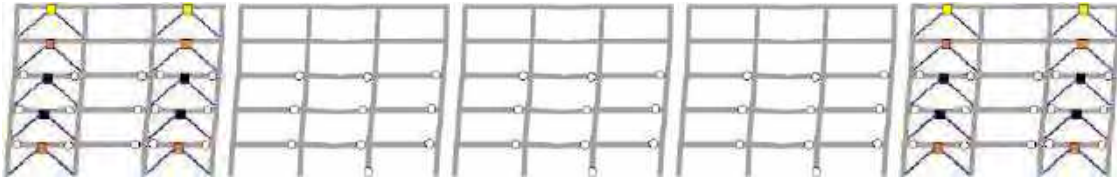


Figura 5.18. Mapeo de fluencias inelásticas MIDAS Gen para modelo de cinco niveles, dirección Y

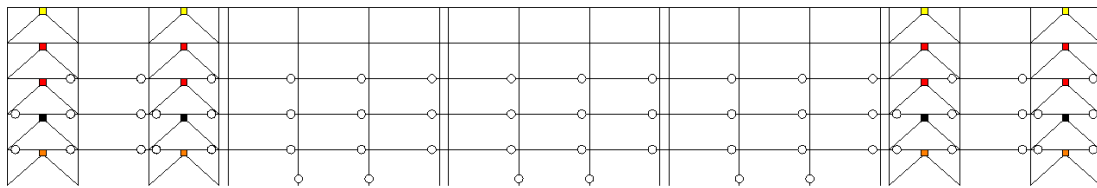


Figura 5.19. Mapeo de fluencias inelásticas DRAIN 2DX para modelo de cinco niveles, dirección Y

De manera general, se aprecia de las tablas 5.4 y 5.5 que la ductilidad del sistema global (Q) es similar para ambas direcciones evaluadas ($Q \approx 5$), tanto para los modelos acoplados como para los tridimensionales. Por otra parte, existen mayores diferencias en los valores de sobrerresistencia obtenidos, y se aprecia que el valor de “R” es menor en la dirección “x” que en la dirección “y”, debido a que en ésta última se cuenta con mayor número de crujías que influyen en una mejor distribución de la resistencia en los elementos involucrados.

5.6 Resultados de análisis dinámicos no lineales paso a paso

5.6.1 Filtrado de señales

Con el objetivo de evaluar la participación de los disipadores en un análisis dinámico no lineal paso a paso con el programa DRAIN-2DX y compararlo con el programa MIDAS Gen, se procedió como primer paso a realizar un filtrado y corrección de todos los registros de aceleración utilizados en los modelos evaluados. El proceso de filtrado y corrección se realizó conforme lo descrito en Gómez *et al.* (2005), donde se establece lo siguiente:

- Corrección de línea base del registro en aceleración, por posibles errores de medición (corrección de línea base).
- Filtrado de la señal en aceleración. Se usó un filtro pasa banda con una frecuencia corte pasa-alta de 0.05 Hz y una frecuencia de corte pasa-baja de 30 Hz.
- Integración del registro en aceleraciones ya corregido por línea base y filtrado, para obtener la historia del registro en velocidad.

- d) Corrección de la línea base del registro en velocidad por errores en el proceso numérico de integración.
- e) Integración del registro corregido en velocidad (por línea base) para obtener el registro en desplazamiento

En la figura 5.20 se presenta de manera esquemática las diferencias de emplear la corrección del registro de aceleración bajo las pautas antes descritas y lo que sucedería si se hiciera caso omiso de ellas. Se aprecia perfectamente que el solo filtrar la señal no es suficiente, pero no aplicar la metodología completa antes expuesta puede acarrear errores al momento de procesar los resultados de los análisis dinámicos paso a paso. Por ejemplo, puede ocasionar incrementos crecientes y poco reales en velocidades y aceleraciones, mientras que un filtrado excesivo eliminaría información importante del sismo (Gómez *et al.* 2005).

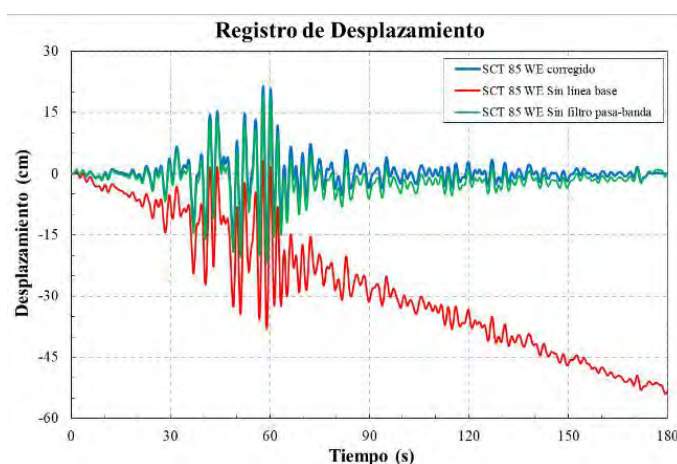


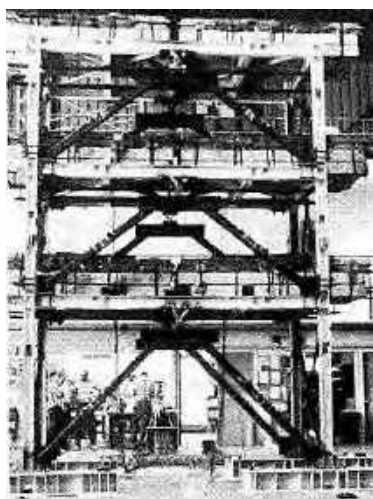
Figura 5.20. Registro de desplazamiento obtenido del registro de aceleración de SCT1-85, WE

5.6.2 Modelo Berkeley

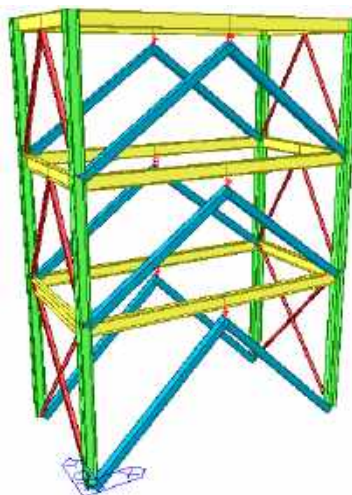
Con la finalidad de realizar y evaluar modelos más complejos que representen las condiciones geométricas, de resistencia y las propiedades dinámicas de modelos reales, se han calibrado los resultados de modelos experimentales con los obtenidos a partir de análisis dinámicos paso a paso creados en MIDAS Gen. Se comparan los resultados presentados por Whittaker y colaboradores (1989), obtenidos a partir de pruebas experimentales de un modelo de tres niveles con disipadores de energía tipo ADAS, sujeto al registro de aceleración “El Centro–33” con dirección norte-sur, ensayado en la universidad de Berkeley en 1988 (figura 5.21a).

Se realizaron dos modelos analíticos comparativos en MIDAS Gen representativos de la figura 5.21b. Éstos se realizaron en tres dimensiones con la configuración geométrica y los pesos de entresijos reportados por Whittaker y colaboradores (1989). Los elementos de vigas y columnas fueron modelados con elementos viga-columna, los contravientos con elementos que trabajan exclusivamente a carga axial y los disipadores con elementos liga.

La diferencia entre los dos modelos evaluados se establece en las propiedades que se dieron de alta para los disipadores de energía. Para el modelo denominado “MOD_EXP”, se utilizaron las propiedades de rigidez y de resistencia de los disipadores reportados en el modelo experimental; para el modelo denominado “MOD_Tena”, se usó la formulación matemática para los disipadores tipo ADAS propuesta por Tena-Colunga (1997). Es importante mencionar que en éste último (“MOD_Tena”), se consideró un modelo numérico acoplado del disipador, es decir, se consideró la interacción de la rigidez de cada una de las direcciones tomadas en cuenta. Caso contrario del modelo “MOD_Exp”, donde se consideró un modelo desacoplado del disipador, dado que únicamente se contaba con datos relativos de rigidez y de resistencia de la dirección principal donde trabajaban.



a) Modelo experimental (Whittaker et al. 1989)



b) Modelo analítico MIDAS Gen

Figura 5.21. Modelo de Berkeley con disipadores tipo ADAS

En la tabla 5.6 se resumen los periodos de vibrar de los modelos evaluados en esta sección; se aprecia de ésta que existe una mejor correlación del primer modo de vibrar para el modelo analítico que tomó en cuenta directamente los datos experimentales, aunque para el segundo modo existen diferencias mayores al 30% para ambos modelos. En las figuras 5.22 y 5.23 se presentan las gráficas de desplazamientos máximos y de distorsiones respectivamente, suscitados por la excitación del registro de aceleración “El Centro-33”. Se aprecia de la figura 5.22 que con la formulación matemática propuesta por Tena-Colunga (1997), se obtiene una buena correlación entre los desplazamientos obtenidos con el modelo matemático y los resultados experimentales. Además, se observa de la figura 5.23 que los resultados de los modelos analíticos presentan diferencias en los valores obtenidos del perfil de distorsiones; por ejemplo, se observa que los resultados del modelo analítico “MOD_EXP” son mayores en todos los entresijos si se compara con lo reportado por Whittaker y colaboradores (1989); mientras que para los valores numéricos obtenidos con el modelo “MOD_Tena”, son similares con los resultados experimentales, sobre todo para efectos prácticos.

Tabla 5.6. Comparativa de periodos de vibrar de Modelos Berkeley

Modelo	T_1	T_2	T_1 Error (%)	T_2 Error (%)
Experimental	0.47	0.17		
MOD_EXP	0.469	0.227	0.13%	33.88%
MOD_Tena	0.413	0.228	12.11%	34.11%

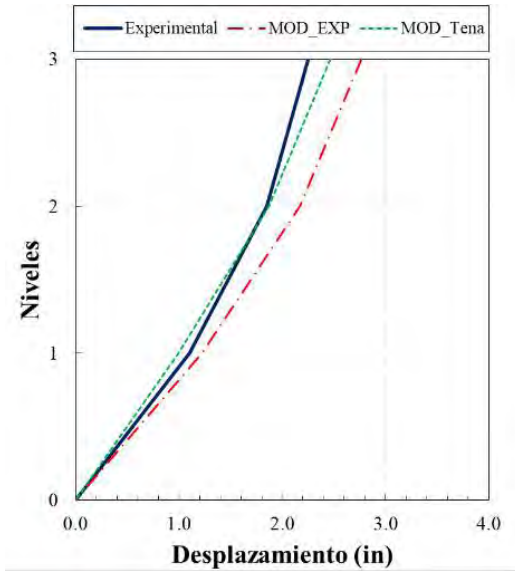


Figura 5.22. Desplazamientos Máximos

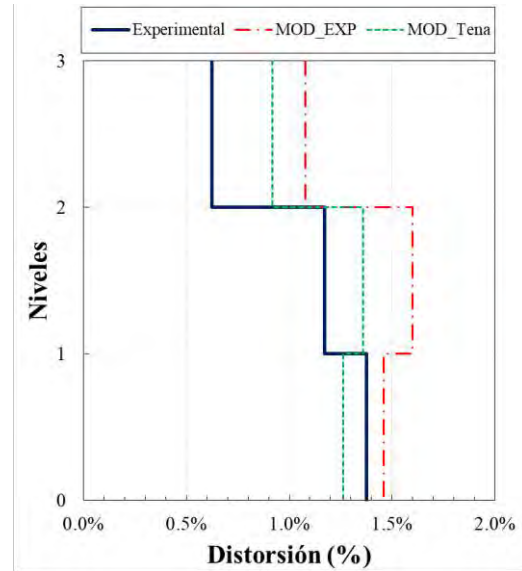


Figura 5.23. Distorsiones de entrepiso

En la figura 5.24 se aprecian los ciclos de histéresis de los disipadores, reportados en la prueba experimental, para cada nivel de entrepiso. Se aprecia de ésta que los dispositivos disipan mayor cantidad de energía en el primer nivel, en otras palabras, el potencial de daño que puede ocasionar el sismo se distribuye a lo largo de la altura del modelo. Además, se desarrollan desplazamientos máximos de hasta 10 veces su desplazamiento de fluencia de manera estable y sin degradación del elemento. En la figura 5.25 se presentan los ciclos de histéresis desarrollados por los disipadores con la formulación matemática de Tena-Colunga (1997). Se observa que para cada uno de los ciclos de histéresis mostrados, existe buena correlación de resultados con pequeñas diferencias en la distorsión última desarrollada por los disipadores, pero la forma del ciclo y la pendiente posterior a la fluencia son idénticas.

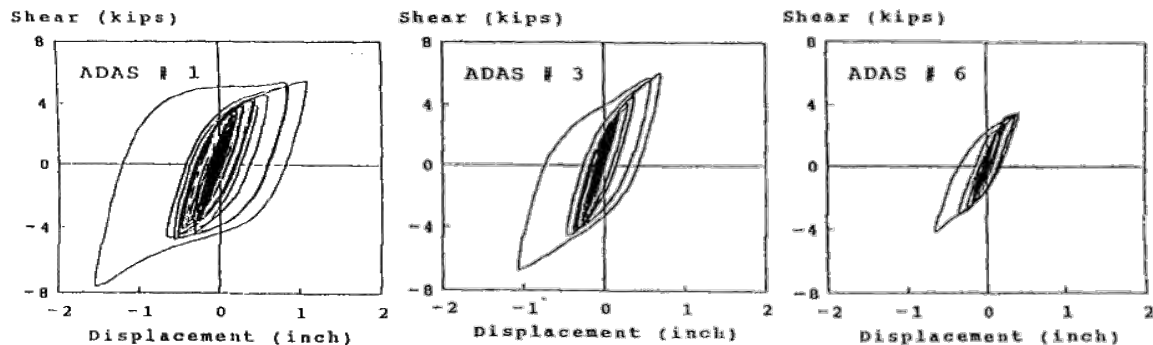


Figura 5.24. Ciclos de histéresis de los disipadores de prueba experimental (Whittaker et al. 1989)

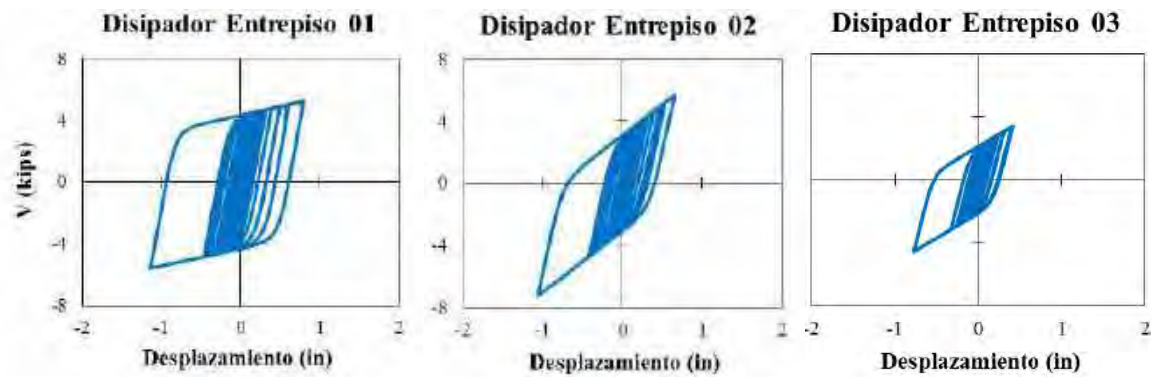
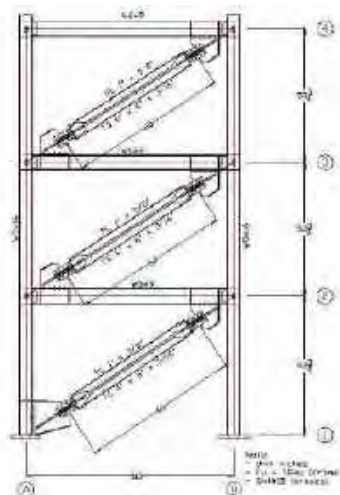


Figura 5.25. Ciclos de histéresis de los disipadores modelados acorde a Tena-Colunga (1997)

5.6.3 Modelo BRB de Vargas y Bruneau

Con el objetivo de utilizar, en capítulos posteriores, dos diferentes configuraciones de disipadores histeréticos de energía para los modelos tridimensionales, se procedió a realizar la calibración analítica de contravientos restringidos contra pandeo (BRB, por sus siglas en inglés), para que el comportamiento de éstos sea representativo de la realidad. Para tal efecto se utilizaron los datos reportados por Vargas y Bruneau del 2006, de un ensaye en mesa vibradora para un marco de acero de tres entrepisos reforzado con BRBs de la marca “Nippon Steel”. Se utilizaron perfiles de acero W6x9 para las vigas y W5x16 para columnas, con altura de entrepisos de 130 cm y el ancho del marco de 150 cm aproximadamente. Los BRBs estaban sujetos a las vigas del marco con placas *Gusset*, con excepción del primer nivel que estaba sujeto a la columna. La finalidad de este tipo de conexión era el evitar daño a las columnas, por lo que se dejó una separación de 7.5 cm como se aprecia en la figura 5.26a. La longitud de los BRBs eran de 150 cms y el corazón metálico de sección rectangular con dimensiones de 1”x5/8” (Vargas y Bruneau, 2006b).



a) Marco con BRB de “Nippon Steel”

b) Vista General del experimento

Figura 5.26. Configuración experimental (Vargas y Bruneau, 2006a)

Para esta prueba experimental los autores sometieron el modelo a varias pruebas de ruido blanco para identificar sus propiedades dinámicas. Se reporta que el marco sin la adición de los BRBs presenta un periodo de $T_{BF}=0.658s$ y con la adición de los BRBs de $T_{BRB} = 0.267s$, lo que hace que el marco de acero aumente seis veces la rigidez del sistema global con la adición de los elementos de disipación de energía.

Se realizaron cinco modelos diferentes con el programa MIDAS Gen para validar la forma de modelado de los BRBs con los datos descritos en el párrafo anterior. Los modelos varían en la longitud del elemento BRB (elemento liga), la configuración de las placas de conexión al marco, y la magnitud de la rigidez de la conexión con placas *Gusset*. Por ejemplo; el modelo A, no considera la longitud ni la rigidez de las placas de conexión; el modelo B y C, considera que las placas de conexión llegan al nodo viga-columna; finalmente los modelos D y E, consideran un modelo más realista de la conexión donde éstas llegan a la viga con excepción del primer nivel (figura 5.27).

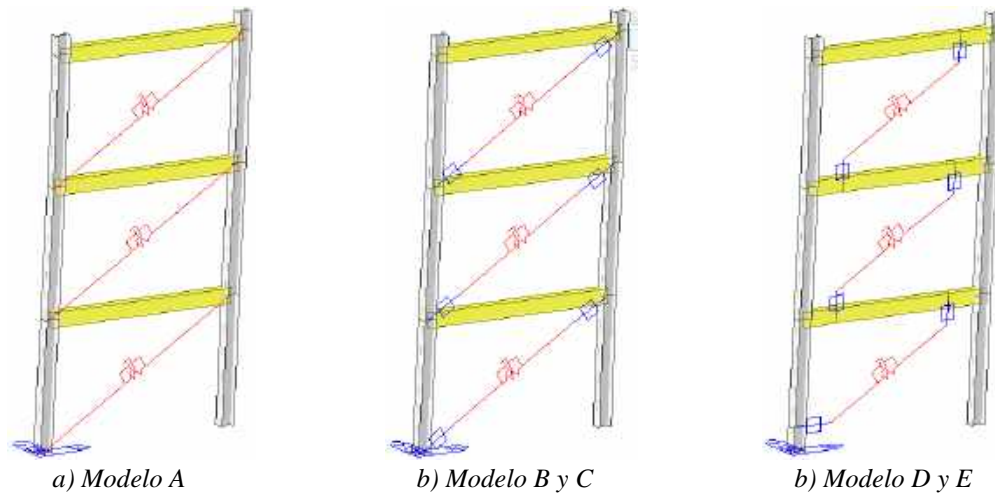
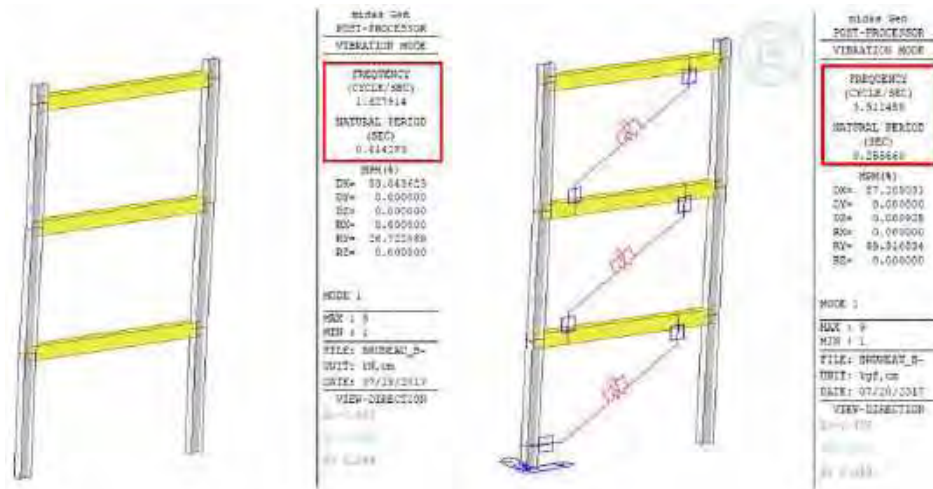


Figura 5.27. Modelos analíticos en MIDAS Gen

En la tabla 5.7 se reportan los periodos obtenidos para cada modelo evaluado y el porcentaje de error para cada uno de éstos. En primera instancia, se modeló el marco sin contravientos para asegurar que las masas y la rigidez de los elementos de vigas y columnas fueran los correctos (figura 5.28a). Se aprecia que el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales es el modelo D (figura 5.28b), en el que se modeló la conexión de las placas *Gusset* como infinitamente rígidas tal como está descrito en el reporte experimental. El usar la magnitud de la rigidez axial para las placas *Gusset* (modelo E) amplía el error al doble en comparación al modelo D.

Tabla 5.7. Comparativa de resultados entre datos experimentales y modelos analíticos en MIDAS Gen

Modelo	BRB		Rigidez de Placas Gusset		T (s)		Error (%)
	L (m)	K (t/m)	PG ₀₁ (t/m)	PG ₀₂ (t/m)	Analítico	Experimental	
BF	-	-	-	-	0.614	0.658	6.68
A	2.42	3466.63	-	-	0.278	0.267	4.12
B	1.52	5511.45	∞	∞	0.239	0.267	10.5
C	1.52	5511.45	305155.4	305155.4	0.242	0.267	9.4
D	1.52	5511.45	∞	∞	0.256	0.267	4.1
E	1.52	5511.45	257286.3	396164.2	0.245	0.267	8.2



a) Marco sin BRB (Modelo A) b) Marco con BRBs de “Nippon Steel” (modelo D)

Figura 5.28. Periodo fundamental de los modelos analíticos en MIDAS Gen

Además, se reprodujo una prueba estática uniaxial para asegurar que los elementos liga, con los que se modelaron los BRBS, se comporten de manera cíclica como lo reportado de los resultados experimentales. El protocolo de carga utilizado es el que se muestra en la figura 5.29, con base en los Criterios Sísmicos para Edificios de Acero Estructural del AISC y de la Oficina Estatal de Planeación y Desarrollo (OSHDP, por sus siglas en inglés). En la figura 5.30 se grafican los ciclos de histéresis obtenidos de la prueba uniaxial de los BRBs de *Nippon Steel*, con base en los datos de fuerza y deformaciones del elemento. De manera general, se aprecia una muy buena correlación entre los resultados experimentales y los analíticos. Se observa que existen ligeras diferencias en la deformación axial máxima positiva, pero que la forma y la cantidad de ciclos de histéresis es la misma.

Table 4.9. Loading Protocol for Static Test

Cycles	Axial Deformation		Inelastic Deformation	Cumulative Inelastic Def.	Axial Deformation (mm)	
	(1)	(2)	(3)	(4)	NSBRB (6)	SSBRB (7)
4		0.2 Δ_{br}	1.0 Δ_{br}	0 Δ_{br}	1.17	1.62
4		0.3 Δ_{br}	1.5 Δ_{br}	4 Δ_{br}	1.75	2.43
4		0.5 Δ_{br}	2.5 Δ_{br}	12 Δ_{br}	2.91	4.05
4		1.0 Δ_{br}	5.0 Δ_{br}	32 Δ_{br}	5.83	8.09
4		1.5 Δ_{br}	7.5 Δ_{br}	52 Δ_{br}	8.74	12.14
4		2.0 Δ_{br}	10 Δ_{br}	72 Δ_{br}	11.65	16.19
2		2.5 Δ_{br}	12.5 Δ_{br}	46 Δ_{br}	14.56	20.23
2		3.0 Δ_{br}	15 Δ_{br}	56 Δ_{br}	17.48	24.28

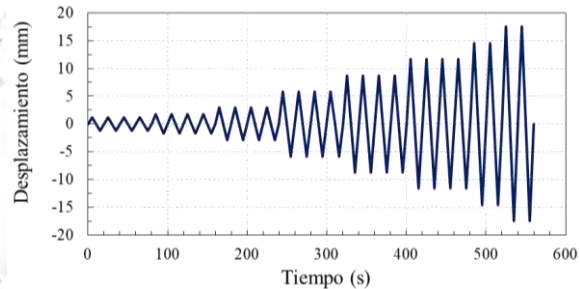


Figura 5.29. Protocolo de carga para prueba estática de BRB (Vargas y Bruneau, 2006b)

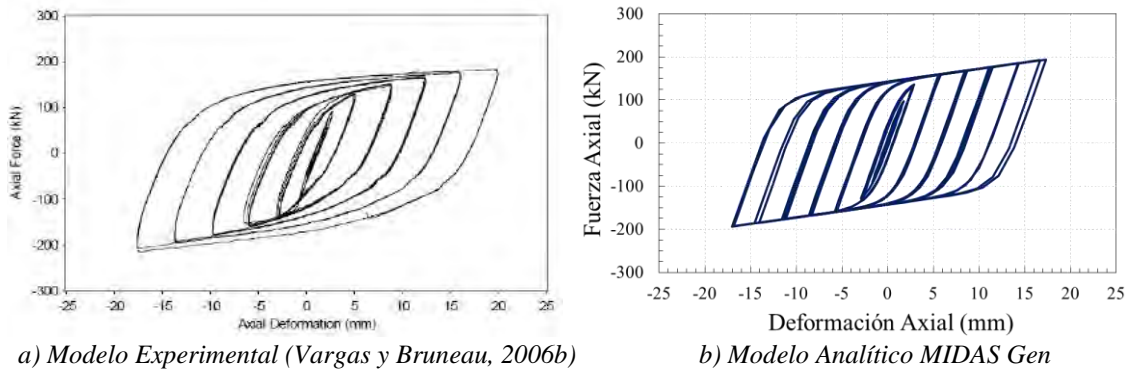


Figura 5.30. Ciclo de Histéresis para Prueba 1 – NSBRB

5.6.4 Marco plano de 20 niveles

Se realizó un análisis dinámico paso a paso al marco plano de 20 niveles, representativo de la figura 5.1b, con balances de rigidez $\alpha=0.25$ y $\beta=0.50$. El modelo de 20 niveles se sometió a una excitación sísmica producida por el registro de SCT1 1985 E-W, con lo que el periodo del modelo estaría cercano al periodo dominante del suelo $T_s=2.0$ s (zona lacustre de la Ciudad de México), y por ende, se estaría revisando el desempeño estructural del marco para una condición máxima de diseño. Para el modelado de los disipadores se utilizaron elementos de liga solo tomando en cuenta la participación en el eje principal a corte del elemento y colocando una restricción al giro como condición de apoyo.

En la figura 5.31 se presentan los ciclos de histéresis de los disipadores para cada entrepiso del modelo en cuestión. En el eje “x” se tienen las distorsiones como porcentajes y en el eje “y” el cociente del cortante actuante entre el cortante con el cual se diseñaron los disipadores. Para cada una de las gráficas, se aprecia en color rojo los resultados obtenidos con el programa DRAIN-2DX y en color azul los resultados obtenidos con el programa MIDAS Gen.

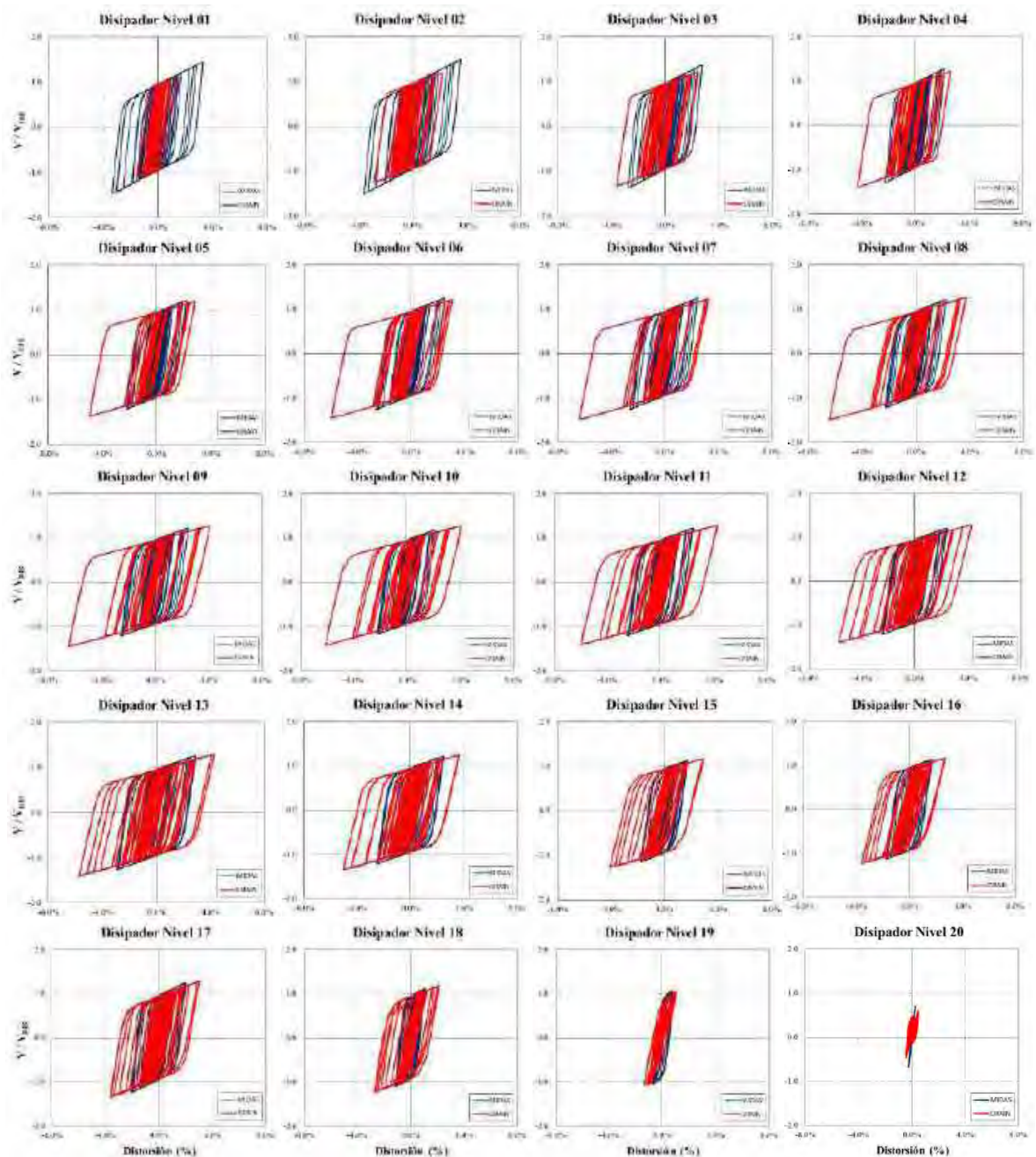


Figura 5.31. Ciclos de histéresis de los disipadores sujetos al registro de aceleración SCT1-85 WE

En párrafos anteriores se ha mencionado que la forma de modelar a los disipadores histeréticos de energía, entre ambos programas (MIDAS Gen y DRAIN 2DX), influye en la revisión de los parámetros evaluados a lo largo de esta sección. Esta primera diferencia en el modelado, ocasiona un ligero cambio de rigidez elástica de los disipadores, que se aprecia en la comparativa de los ciclos de histéresis de éstos para cada entrepiso en estudio (figura 5.26).

Este efecto ocasiona a su vez que la rigidez elástica del sistema completo sea diferente, tal como se aprecia en la curva cortante basal normalizado-distorsión global de azotea de la figura 5.11; por este motivo, los periodos obtenidos entre los dos programas son diferentes y se aprecia que el periodo del marco con disipadores modelado con MIDAS Gen es menor que aquél que se obtiene con DRAIN-2DX (tabla 5.3). Con esto se comprueba que los disipadores modelados con DRAIN-2DX, como un elemento viga-columna, tienden a ser más flexibles, dado que se incluye la rotación del disipador. Finalmente de la figura 5.31 se aprecia que los disipadores modelados como elemento liga en MIDAS Gen, desarrollan menos ciclos de histéresis y como consecuencia desarrollan también menores magnitudes de distorsión, sobre todo a partir del disipador referente al cuarto entrepiso y hasta el disipador del entrepiso 16, tal como se aprecia en la figura 5.31.

5.6.5 Marcos acoplados y modelos tridimensionales de cinco niveles

Para los análisis dinámicos paso a paso del modelo acoplado y tridimensional de cinco niveles, se evaluaron distintos registros de aceleración sintéticos para la zona de transición de la Ciudad de México (Godínez 2005, Tena-Colunga *et al.* 2007), con el fin de hacer coincidir el periodo fundamental del modelo analítico con el periodo donde se presenta la máxima aceleración de los registros y, de esta manera, que los disipadores desarrollaran su máxima capacidad para el cual fueron diseñados. Con los registros de aceleración corregidos y filtrados, se procedió a obtener los espectros de pseudoaceleración mostrados en la figura 5.32, para las direcciones Este-Oeste y Norte-Sur respectivamente. La línea en negro representa el periodo fundamental de vibrar de los modelos de cinco niveles con disipadores de energía para las direcciones correspondientes, los cuáles no presentan diferencias significativas entre ellos dentro de este rubro (tabla 5.4 y 5.5).

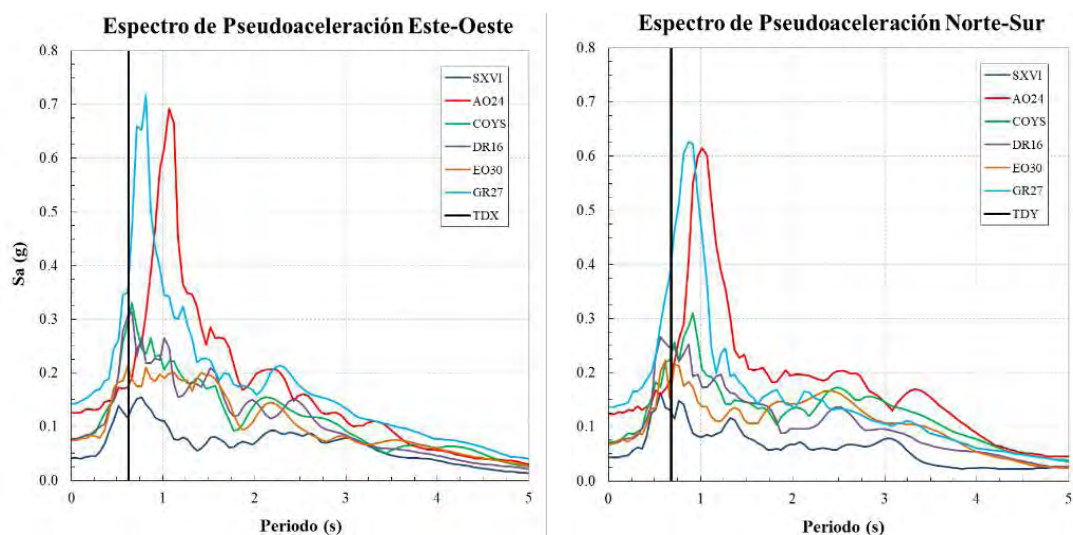


Figura 5.32. Espectros de pseudoaceleración para registros sintéticos de la zona de transición de la Ciudad de México generados por Godínez (2005)

Se decidió utilizar los registros de aceleración sintéticos nombrados AO24 y GR27 (figura 5.33), dado que las ordenadas espectrales máximas de ambos registros están cercanos al periodo dominante de los modelos analíticos a evaluar. A partir de estos registros de aceleración sintéticos se obtuvieron los ciclos de histéresis de los disipadores del modelo de marcos planos acoplados de cinco niveles en cada dirección de análisis, y de esta manera hacer la comparativa con el modelado riguroso tridimensional (figura 5.1c).

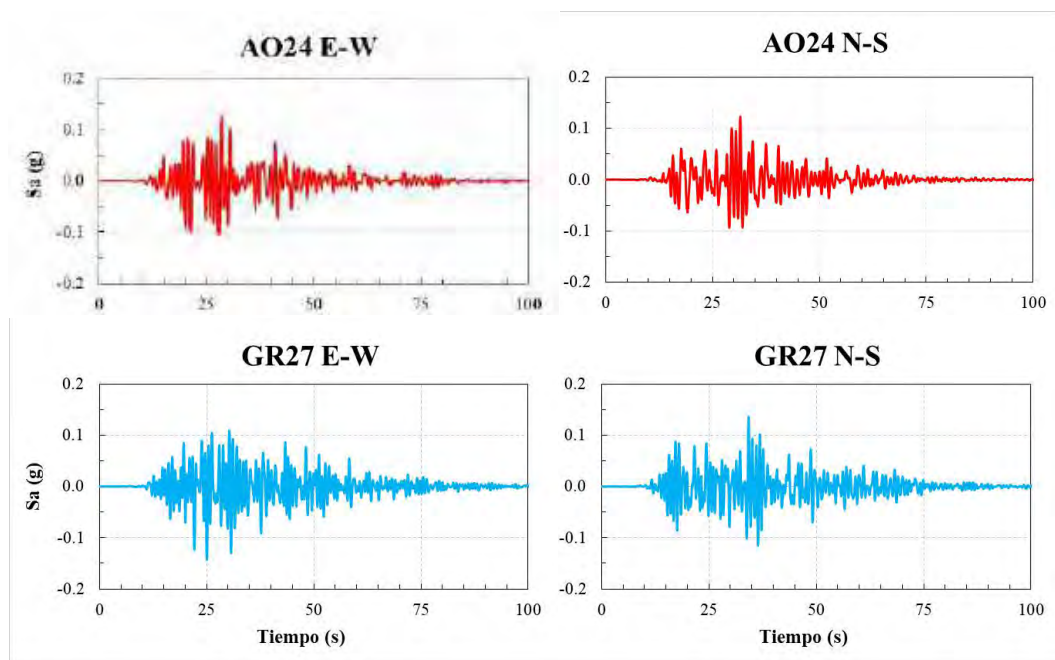


Figura 5.33. Registros sintéticos de aceleración generados por Godínez (2005)

En las figuras 5.34 y 5.35 se presentan los ciclos de histéresis desarrollados por los modelos de cinco niveles con disipadores de energía al inducirle el registro de aceleración sintético AO24. En color verde, se presentan los resultados obtenidos con el programa DRAIN-2DX para los marcos acoplados (figuras 5.2 y 5.3); en color rojo, los resultados de un solo marco con disipadores representativo de la figura 5.1a; y en color azul, los resultados del modelo tridimensional que se obtuvieron del análisis con el programa MIDAS Gen (figura 5.1c).

Comparando los resultados de los ciclos de histéresis desarrollados por los disipadores colocados en la dirección “x” (figura 5.34), se aprecia que el hecho de no considerar todos los coeficientes de la matriz de rigidez a tomar en cuenta, como si fuera un elemento viga-columna, lidera a que los disipadores desarrollen más ciclos de histéresis y una distorsión última mayor, que si se compara con los otros modelos en estudio desarrollado en DRAIN 2DX. Comparando los periodos dominantes en la dirección “x” entre los modelos del marco plano y del modelo tridimensional (tabla 5.4), se aprecia que éstos son similares y, por ende, los ciclos de histéresis para ambos modelos son parecidos entre sí en cada uno de los cinco entresijos evaluados (curvas en rojo y azul).

Evaluando los ciclos de histéresis desarrollados por los disipadores en la dirección “y”, obtenidos por MIDAS Gen (curvas azules) y DRAIN-2DX (curvas verdes) de la figura 5.35, se presenta la misma tendencia que los resultados comentados para los mismos modelos en la dirección “x”. Se observa también que para los resultados obtenidos con el registro AO24, los disipadores desarrollan mayor ductilidad en la dirección “y” que en la dirección ortogonal a ésta.

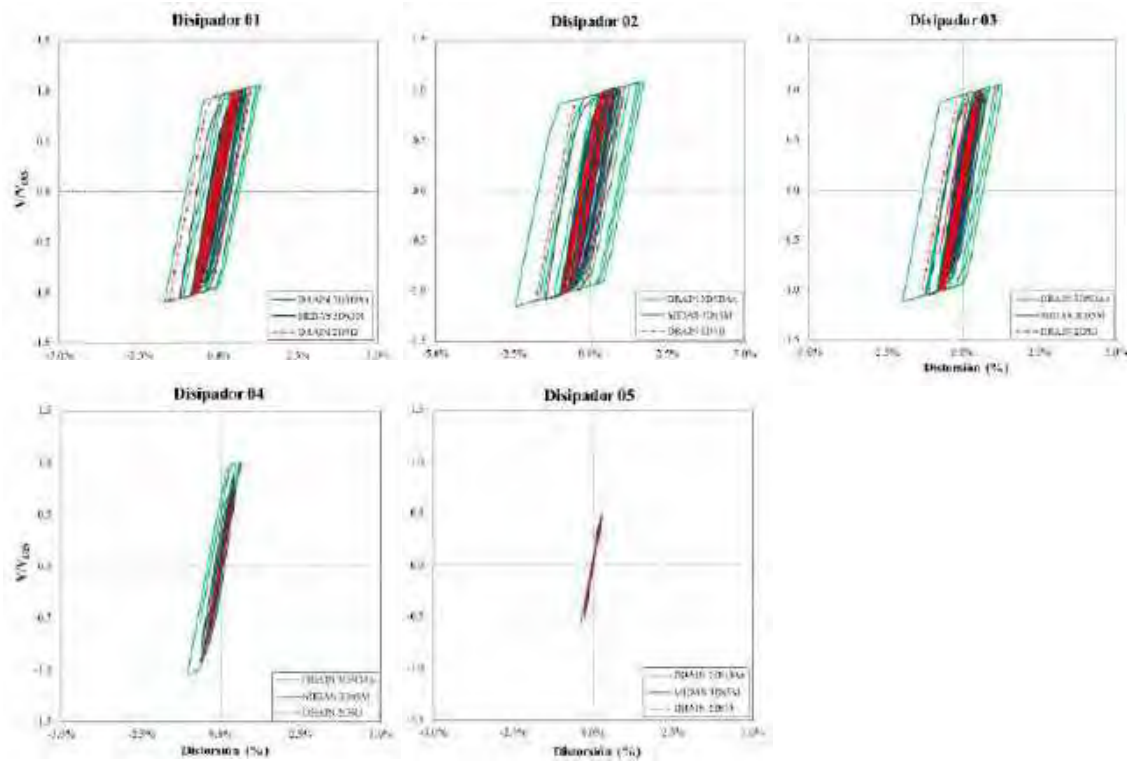


Figura 5.34. Ciclos de histéresis para el acelerograma AO24 de los disipadores de energía, dirección X

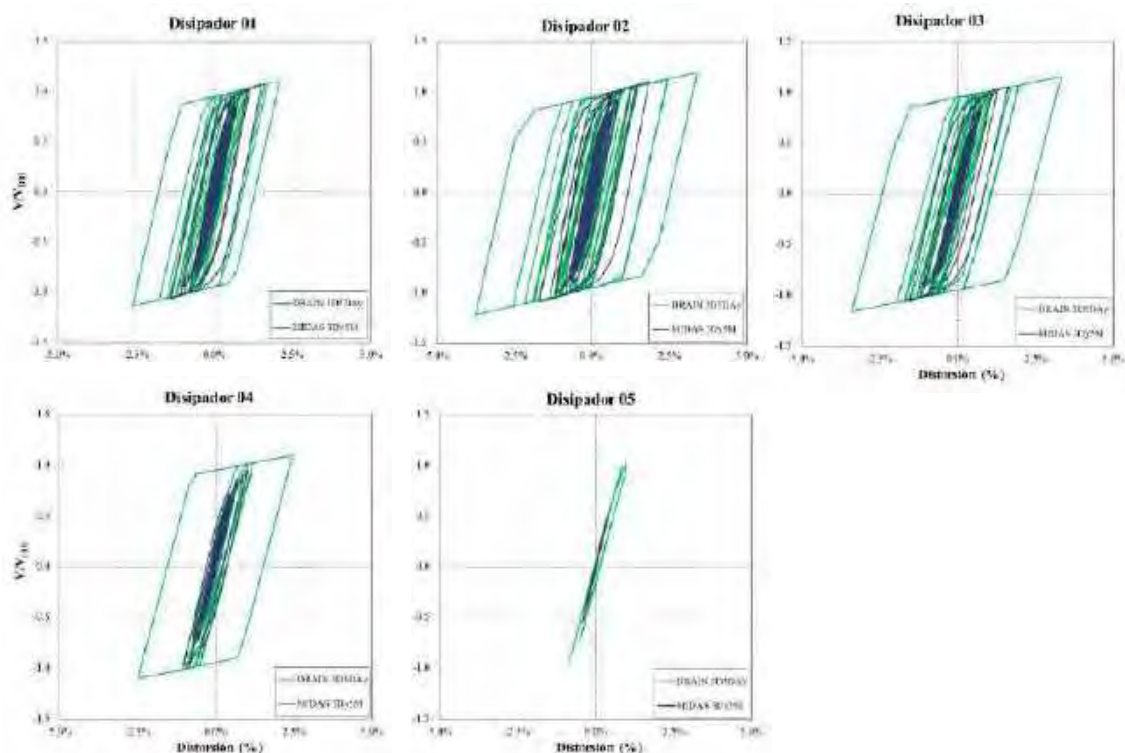


Figura 5.35. Ciclos de histéresis para el acelerograma AO24 de los disipadores de energía, dirección Y

5.7 Comentarios finales

De manera general se observa que en un modelado tridimensional riguroso (en Midas Gen), se presenta mayor rigidez de los nudos viga-columna, pues esa zona rígida se modela tomando en cuenta más grados de libertad, con lo cual impacta de manera significativa en la rigidez global de la estructura con respecto a la que puede hacerse en marcos planos (DRAIN-2DX), donde la zona rígida se modela en el plano conforme a la teoría general de elementos viga-columna (por ejemplo, Tena 2007). Asimismo, se han observado diferencias en las propiedades dinámicas de los modelos evaluados ocasionados por la forma de modelar el disipador de energía. A lo largo de este capítulo se han probado diversas configuraciones entre el uso de elementos viga-columna y de elementos de liga para una mejor representación del comportamiento real de dichos dispositivos. De manera general, se ha observado que modelando a los disipadores como elementos viga-columna, proporciona una buena correlación con los resultados reportados de trabajos experimentales (Tena-Colunga 1997), debido a que con este tipo de elemento se puede representar de manera adecuada el giro además de todas las componentes en los planos principales en el cual trabaja el disipador.

Con el programa MIDAS Gen, se logró reproducir de manera adecuada los resultados de análisis estáticos no lineales obtenidos con el programa DRAIN 2DX, utilizando la misma hipótesis de modelado que el propuesto por Tena-Colunga (figura 5.10). Para los análisis dinámicos paso a paso no lineales, se encontraron diferencias significativas en los ciclos histeréticos que los disipadores logran desarrollar; por ejemplo, se obtuvieron diferencias

notorias en la distorsión última y en los ciclos histeréticos que los dispositivos desarrollan incluso en modelos pequeños (figura 5.34 y 5.35). Esto se debe a que el autor comparó el usar elementos de liga (resortes de desplazamiento) tomando en cuenta todas las propiedades mecánicas del disipador en cuestión, con el uso de expresiones de trabajos previos (Tena-Colunga 1997); no obstante, para fines prácticos se encontró buena correlación entre los datos reportados experimentalmente (Whittaker *et al.* 1989) con los del modelado analítico para efectos prácticos (figuras 5.22, 5.23 y 5.25).

Por otra parte se observó que las diferencias son más significativas conforme el modelado aumenta su relación de esbeltez; es decir, si no se modela adecuadamente al disipador de energía con todas sus propiedades mecánicas para el análisis, éste tiende a ser más flexible que lo reportado en trabajos experimentales y por ende el sistema completo se vuelve más flexible también, incluso tomando en cuenta la longitud del dispositivo y con ello afectando directamente el ángulo de contraventeo (tabla 5.3 y figura 5.31). Con base en los resultados obtenidos a lo largo de esta sección, para los modelos posteriores se usarán las formulaciones del trabajo de Tena-Colunga (1997) y se modelarán los disipadores como elementos tipo viga-columna, con lo que se calculará y usará para los diferentes análisis todas las propiedades mecánicas de los dispositivos. Además, se modelará la longitud del dispositivo para tomar en cuenta en el análisis el cambio del ángulo de contraventeo con respecto a la horizontal, para un modelo más apegados a la realidad.

6. DISEÑO DE EDIFICIOS TRIDIMENSIONALES CON BASE EN PARÁMETROS SÍSMICOS PROPUESTOS

En este capítulo se presentan los resultados de los diseños de tres edificios de concreto reforzado con disipadores de energía por histéresis del material, utilizando los parámetros sísmicos propuestos en el capítulo cuatro. De manera particular se revisaron que los elementos estructurales cumplieran con los requisitos de resistencia especificados en las Normas Técnicas Complementarias de Estructuras de Concreto para elementos no dúctiles (vigas y columnas) y de estructuras metálicas (contravientos). Además, se adicionaron al proceso de diseño los requisitos mínimos de detallado dúctil para aumentar la capacidad de rotación de los elementos en cuestión, y de esta manera evitar que vigas y columnas incursionaran en su intervalo no lineal. También, se revisó que el sistema completo satisficiera los requisitos de desplazamiento para limitación de daños a elementos no estructurales y de limitación de daño al sistema del marco cuando los disipadores alcanzan la ductilidad última objetivo. El procedimiento de diseño empleado se basa en balances de rigidez entre los distintos sistemas empleados (marco-contraviento-disipador), el cual está comentado con detalle en trabajos previos a éste (Nangullasmú 2011, Tena y Nangullasmú 2013, Tena-Colunga y Nangullasmú-Hernández 2015). Finalmente, se comparan las diferencias entre considerar la base de los modelos como empotradas y flexibles tomando en cuenta la interacción suelo-estructura, la cual es de suma importancia para la respuesta estructural de edificios desplantados en suelos blandos como los presentados en la zona lacustre del Valle de México.

6.1 Descripción de la metodología de diseño propuesta

Para el diseño de los modelos tridimensionales de este capítulo, se empleó una metodología basada en balances de rigidez entre los diversos elementos sismorresistentes involucrados en el sistema global (marco-contraviento-disipador), la cual ha sido descrita con detalle en trabajos previos (por ejemplo, Nangullasmú 2011, Tena y Nangullasmú 2013, Tena-Colunga y Nangullasmú-Hernández 2015). De manera esquemática, se ilustra en la figura 6.1 el procedimiento general de diseño para edificios de concreto reforzado con disipadores de energía montados en contraviento metálico tipo chevrón. La principal diferencia con los trabajos previos antes mencionados es que para los modelos planos se proponía un cortante basal estático del 10% del peso total de la estructura; sin embargo, para los modelos tridimensionales se han tomado en cuenta las propuestas obtenidas de estudios paramétricos previos para utilizarlos dentro de una metodología de diseño resiliente acorde a lo usado y conocido por la práctica ingenieril mexicana.

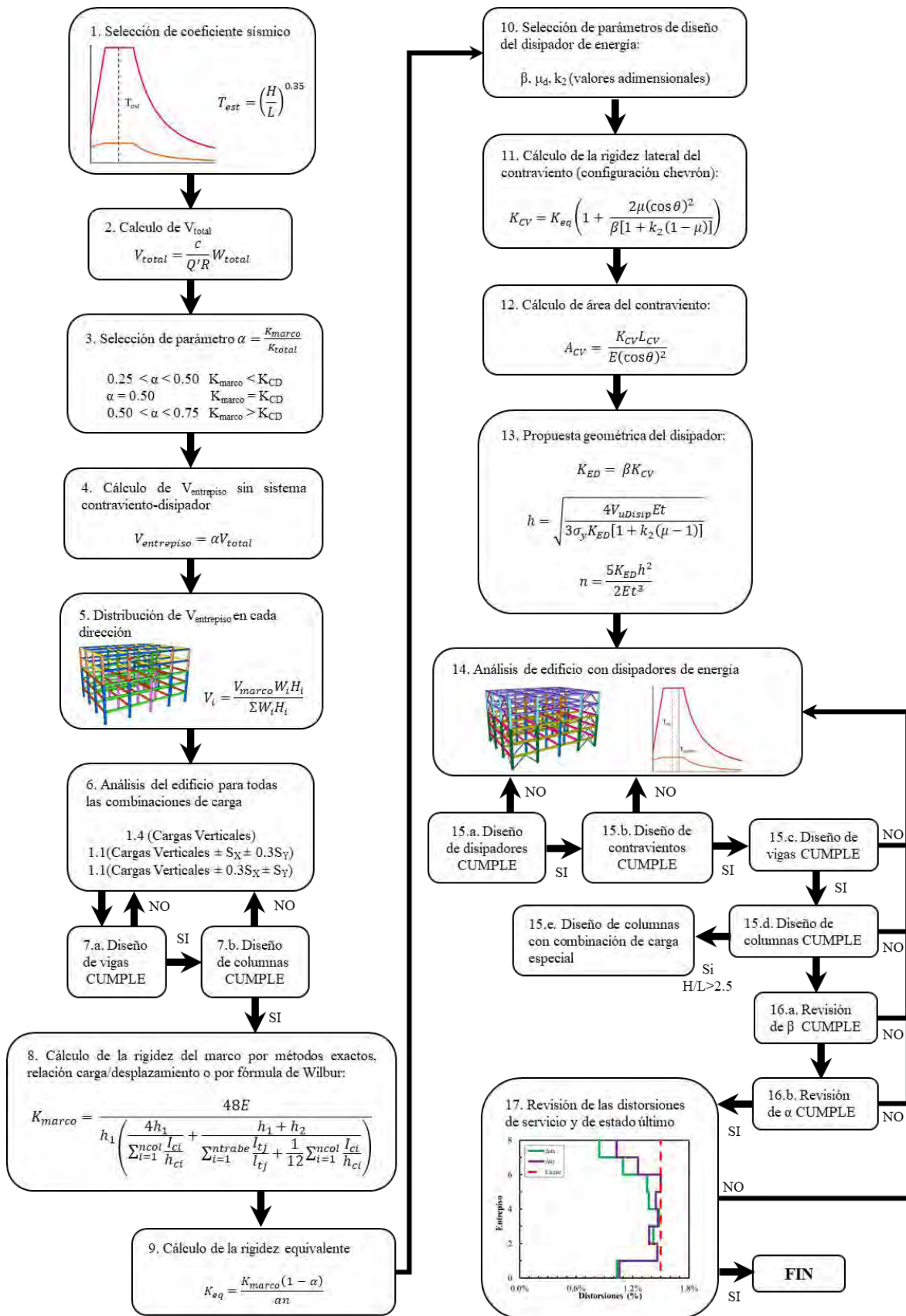


Figura 6.1. Procedimiento general de diseño para edificios de concreto reforzado con disipadores de energía

El primer paso a considerar es la selección de un coeficiente sísmico de diseño a partir de la selección del espectro de respuesta, para la zona donde se desplantará el edificio, y la estimación del periodo fundamental de la estructura. La reducción de las ordenadas del espectro elástico estipulado en el apéndice A de las NTCS-04, se hace con las propuestas de ductilidad (Q) y sobrerresistencia (R) expuestas en el capítulo cuatro. Dicho coeficiente sísmico de diseño se usa para el cálculo del cortante basal estático, el cual se distribuye acorde a los pesos y a la altura de cada entrepiso. Como primera iteración de diseño se elabora un modelo analítico del edificio conformado sólo por los sistemas de marcos a momento, es decir, en este modelo no se toma en cuenta el aporte de rigidez ni de resistencia del sistema contraviento-disipador. Por ende, se hace la selección del parámetro α , el cuál es el balance de rigidez entre el marco y el contraviento-disipador, el cual afecta al cortante estático de diseño. La selección del parámetro α depende del criterio del diseñador, pero se sugiere tomar en cuenta las recomendaciones de la tabla 4.13, donde se establece que a mayor relación de esbeltez, mayor debe ser la rigidez que debe aportar el sistema del marco para obtener un diseño resiliente.

El pre-diseño de los elementos del marco se hace con base en los elementos mecánicos obtenidos de las combinaciones de cargas estipuladas dentro del reglamento de interés. Es importante mencionar, que al ser un diseño tridimensional, se toman en cuenta efectos ortogonales con la regla de 100-30; además, se considera una excentricidad accidental del 5% de la longitud perpendicular en planta a la dirección de análisis. De manera puntual se revisa que todas las vigas y columnas cumplan con los requisitos de resistencia establecidos en las NTCC-04. Para el diseño a flexión de las vigas se consideró el procedimiento por tanteos descrito en González y Robles (2005), tomando en cuenta que las vigas están doblemente armadas. Asimismo, se utilizó un diseño por capacidad para asegurar el mecanismo de columna fuerte – viga débil; en otras palabras, el momento de diseño para las columnas se determina con base en el equilibrio del nodo, para esto se considera que la sumatoria de momentos de la columna sea al menos 1.5 veces la sumatoria de momentos en la viga para el nodo donde concurren los elementos de interés. Como se establece en el capítulo cuatro y se menciona en párrafos anteriores, las vigas y columnas se diseñan como elementos de concreto reforzado de ductilidad limitada ($Q=2$), pero se complementa su diseño con requisitos de refuerzo transversal de ductilidad alta ($Q=4$); estos requisitos están asociados al aumento del diámetro y del número de ramas empleadas, así como a la disminución de la separación entre estribos.

Una vez que se cumple con el pre-diseño de vigas y columnas, se calcula la rigidez del marco y, a partir de ésta, la que aporta el sistema contraviento-disipador. Conociendo la rigidez del marco y con la propuesta del parámetro α , se procede a realizar el pre-diseño de los contravientos de soporte y de los disipadores con los pasos 9 a 13 descritos en la figura 6.1. La propuesta geométrica del disipador se hace con base al balance de rigidez con respecto al contraviento de soporte (β). El predimensionamiento de su altura (peralte) queda en función de la rigidez inicial y ductilidad local del dispositivo, así como de las propiedades mecánicas del material con el que está hecho. Finalmente, la cantidad de placas, área requerida o tipo

de perfil del dispositivo (dependiendo del dispositivo de interés) se propone a partir de su rigidez elástica, del módulo de elasticidad, la altura, y espesores propuestos por el ingeniero estructural con base en su experiencia y/o asesoría de algún fabricante.

Con todos los elementos estructurales prediseñados, se realiza un modelo analítico que incluya vigas, columnas, contravientos y disipadores. En este trabajo en particular, el modelado de los disipadores ADAS se hace conforme a las recomendaciones de Tena-Colunga (1997), para tomar en cuenta dentro todas las componentes de la matriz de rigidez para dicho elemento. El diseño final de todos los elementos involucrados se hace a partir de un análisis dinámico modal espectral, el cual toma en cuenta el periodo fundamental de la estructura para cada dirección de análisis. Cabe señalar que siempre existirá una variación del periodo estimado en el primer paso con respecto al calculado con el análisis, y ésta se hará mayor dependiendo de la irregularidad del edificio, de la adición de otros sistemas estructurales que aporten rigidez lateral o flexibilidad al modelo. Para asegurar un diseño estructural resiliente de todo el edificio, se diseña primero el elemento que fungirá como el fusible de todo el sistema, es decir, primero se diseñan los disipadores, luego los contravientos de soporte que deben permanecer elásticos, posteriormente las vigas (segunda línea de defensa inelástica, reserva en caso necesario) y finalmente las columnas y nudos, que deben garantizarse que permanezcan elásticos. Para el diseño de las columnas se tomaron en cuenta una combinación de diseño especial para edificios muy esbeltos, la cual se detalla en párrafos posteriores a éste. Si alguno de los elementos antes mencionados no cumplen con los requisitos de resistencia, se modifican sus propiedades geométricas y/o mecánicas para satisfacer todos los parámetros estipulados. Una vez que se cumpla con los requisitos de resistencia de todos los elementos, se revisa que las propuestas de β y α queden dentro de un intervalo parecido a los propuestos por el diseñador en la etapa inicial de pre-diseño. En caso contrario, se deben modificar las condiciones del modelo analítico y repetir el paso 14 (figura 6.1)

Finalmente, se revisa que las secciones propuestas cumplan con los requisitos de desplazamiento asociados a condiciones de servicio o de limitación de daño a elementos no estructurales (Δ_y), y a condiciones últimas asociado a la limitación de daño de vigas y columnas, cuando los disipadores alcanzan su ductilidad objetivo (Δ_u). Estos valores se proponen en el capítulo cuatro de este documento (figuras 4.28 y 4.29). Si se cumple con los requisitos de resistencia, de desplazamiento, y los balances de rigidez β y α son parecidos a los propuestos inicialmente, se puede dar por concluido el proceso de diseño del edificio de concreto reforzado con disipadores histeréticos de energía. Para los modelos que se presentan en este capítulo, se utilizó un concreto con resistencia a compresión de $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$ para vigas y columnas para los modelos de ocho y 15 entrepisos; aunque, para el modelo más esbelto en estudio, se incrementó el valor antes expuesto a $f'_c=300 \text{ kg/cm}^2$ para lograr satisfacer los requisitos mínimos de espacio libre entre claros y alturas mínimas. Para el diseño de los contravientos se optó por utilizar un acero de tipo A-36 con una resistencia nominal a la fluencia de $f_y=2530 \text{ kg/cm}^2$ para todos los casos de estudio.

6.2 Descripción de los edificios estudiados

La configuración geométrica de los modelos en estudio corresponde a edificios de oficina, regulares en planta y elevación, formado por cuatro crujiás de 800 cm de claro en dirección x y tres crujiás de 700 cm en dirección y (figura 6.2). Las alturas de entrepiso son de 400 cm en todos los niveles con distinto ángulo contraviento, con respecto a la horizontal, para cada dirección a analizar ($\theta_x \approx 45^\circ$ y $\theta_y \approx 49^\circ$).

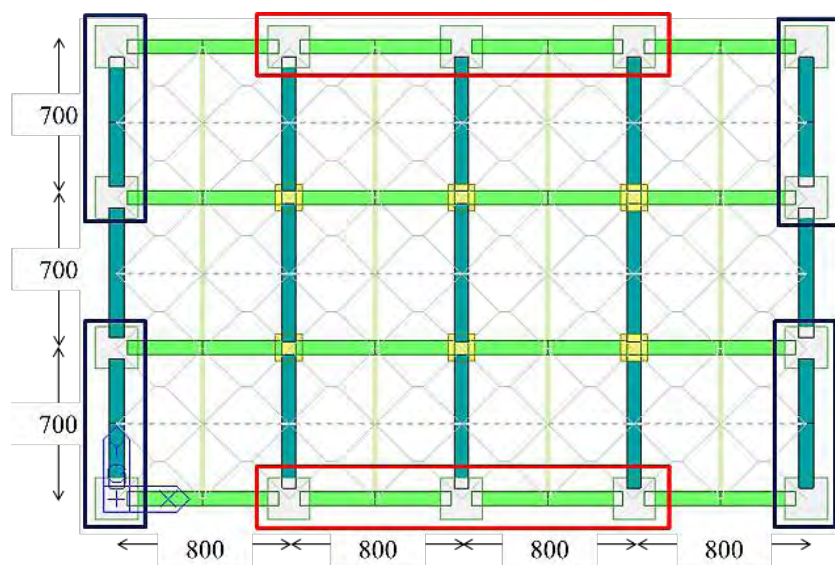


Figura 6.2. Distribución en planta de modelos con disipadores de energía

Dos crujiás exteriores cuentan con el sistema contraviento-disipador y están enmarcados con rectángulos en la figura 6.1. Se eligió esta distribución de los elementos de contraviento para evitar que las columnas de las esquinas presentarán mayor demanda de carga axial. Se observa también de esta figura la presencia de vigas secundarias (30x45 cm) en ambas direcciones para una mejor distribución de la carga vertical (Apéndice A), dado que se ha demostrado también con estudios que diseñar de esta manera balancea de mejor manera la respuesta inelástica en las dos direcciones ortogonales principales de estructuras con base en marcos de concreto reforzado (dúctiles y no dúctiles), en comparación de disponer vigas secundarias sólo en una dirección (Tena-Colunga *et al.* 2008, Tena *et al.* 2012). En consecuencia, se disminuyó el peralte del sistema de piso, el cual fue diseñado como losa maciza de concreto reforzado de 10 cm de espesor (Apéndice B).

Los cambios de colores en las figuras 6.2 y 6.3 representan esquemáticamente los cambios de secciones transversales en los modelos en estudio. En la figura 6.2 se aprecia que se utilizan dos propiedades diferentes para representar las vigas en cada una de las direcciones de análisis. Aunque se usó la misma sección transversal, se hacen diferencias en los armados longitudinales y transversales para el cumplimiento de las demandas impuestas con las condiciones de cargas consideradas. Por otra parte, se usaron propiedades diferentes para las columnas de los marcos exteriores con respecto a la de los marcos interiores, siendo los

primeros más robustos que los segundos. De la figura 6.3 se observan cambios de secciones conforme el edificio aumenta en altura. La intención es hacer el diseño de los elementos más eficiente y reducir el peso total de la estructura, aunque se aseguró que no hubiesen cambios de secciones de vigas, columnas y contravientos en el mismo entrepiso (figura 6.3), con el objetivo de mitigar el efecto de piso suave o piso débil por el cambio abrupto de rigidez y/o resistencia.

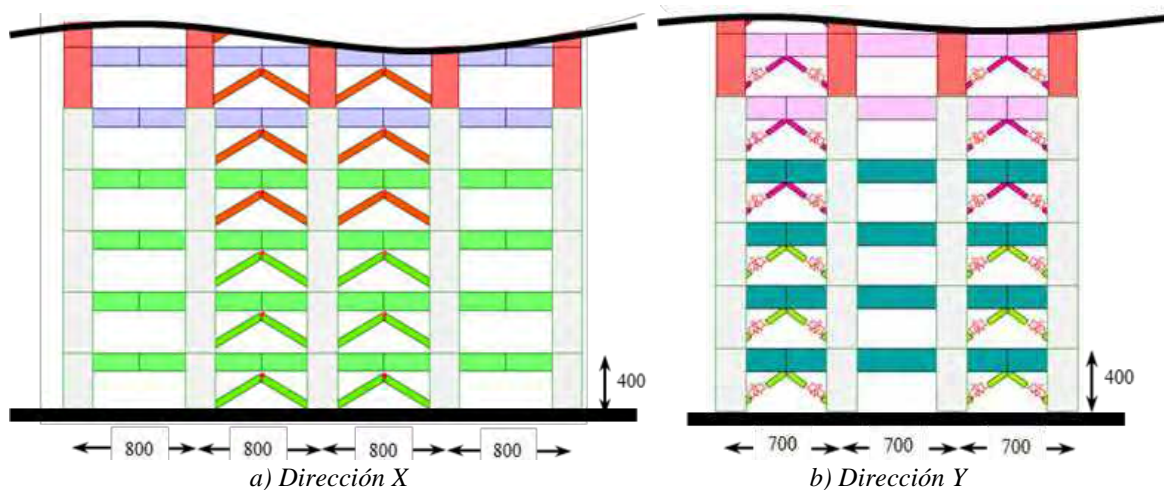


Figura 6.3. Distribución en elevación de modelos con disipadores de energía

La altura de los modelos se variaron en ocho, 15 y 24 entrepisos para evaluar diferentes relaciones de esbeltez. Es importante señalar que el modelo más pequeño en estudio (ocho niveles), es el único que cumple con todas las condiciones de regularidad especificadas en las NTCS-04 en su sección 6.1. Los modelos de 15 y de 24 niveles no satisfacen la condición de que la relación de su altura a la dimensión menor de la base no sobrepase el valor de 2.5, lo cual se tomó en cuenta en la corrección por irregularidad del parámetro Q' empleado en los espectros inelásticos para diseño.

Con la experiencia de modelos de marcos planos evaluados en el capítulo cuatro, se decidió utilizar distintos balances de rigidez entre los sistemas involucrados para cada dirección en estudio. En la tabla 6.1 se resumen los balances de rigidez utilizados para los modelos tridimensionales. De ésta, se aprecia que el valor de " α " siempre es mayor en la dirección y, debido a que su relación de esbeltez también será mayor con respecto a la de su dirección ortogonal. Aunado a esto, el balance α aumentará conforme la altura de los modelos se incrementa. Con estas dos condiciones se pretende que conforme el sistema global sea más flexible, la aportación de rigidez lateral de vigas y columnas sea mucho mayor; y como consecuencia, al ser más flexible el sistema contraviento-disipador, se prevé que la participación no lineal se concentre exclusivamente en los disipadores histeréticos de energía con algunas fluencias incipientes en vigas sobre todo en los modelos más flexibles.

Además, se usaron distintos balances de rigidez entre el disipador y el contraviento (β) para cada dirección de análisis, con el objetivo de evaluar el comportamiento de dos configuraciones de disipadores histeréticos de energía. Para las crujías enmarcadas en color rojo en la dirección x (figura 6.2), se usaron elementos disipadores de energía representativos de un $\beta=0.50$ (ADAS). Para la dirección y , las crujías enmarcadas en color azul de la figura 6.2, se utilizaron contravientos restringidos contra pandeo (BRB, por sus siglas en inglés), que son disipadores representativos de un $\beta=1.0$.

Tabla 6.1. Balances de rigidez empleados en los modelos tridimensionales

	α_x	α_y	β_x	β_y
8N	0.25	0.35	0.50	1.00
15N	0.35	0.50	0.50	1.00
24N	0.50	0.65	0.50	1.00

6.3 Modelado de disipadores de energía

6.3.1 ADAS (Added Damping And Stiffness)

Para el diseño y modelado de disipadores tipo ADAS, se usaron las formulaciones de Tena-Colunga (1997). En dicho trabajo se realizó un análisis de regresión para obtener funciones exponenciales que mejor se ajustarán a la geometría del disipador en cuestión (figura 6.4). Asimismo, se presentan fórmulas para calcular cada elemento de la matriz de flexibilidad y de rigidez, según conveniencia. También, se desarrollan formulaciones para el cálculo de fuerzas axiales, cortante y de momentos plásticos que este tipo de dispositivo desarrolla (Tena-Colunga 1997). Este tipo de disipador fue el utilizado para la evaluación de los modelos tridimensionales a partir de análisis no lineales (estático y dinámico). Se modelaron con la longitud del dispositivo obtenida del proceso de diseño y se tomó en cuenta en los análisis todos los elementos de la matriz de rigidez de manera acoplada.



Figura 6.4. Términos para la matriz de flexibilidad de elemento ADAS (Tena-Colunga 1997)

6.3.2 TADAS (Triangular Added Damping And Stiffness)

Para el diseño de disipadores tipo TADAS, se usaron las formulaciones originalmente desarrolladas por Tsai y colaboradores (1993) y según se presentan en Vargas y Bruneau (2006a). En la figura 6.5 se presentan de manera esquemática un marco con disipadores tipo TADAS montados en contravientos con configuración chevrón. Se presentan fórmulas para calcular la rigidez lateral del disipador en función del espesor, del número de placas, la altura y el ancho de éste. En el proceso de diseño se vigiló que el ancho del disipador (b) no excediera el ancho de la viga del entrepiso en cuestión.

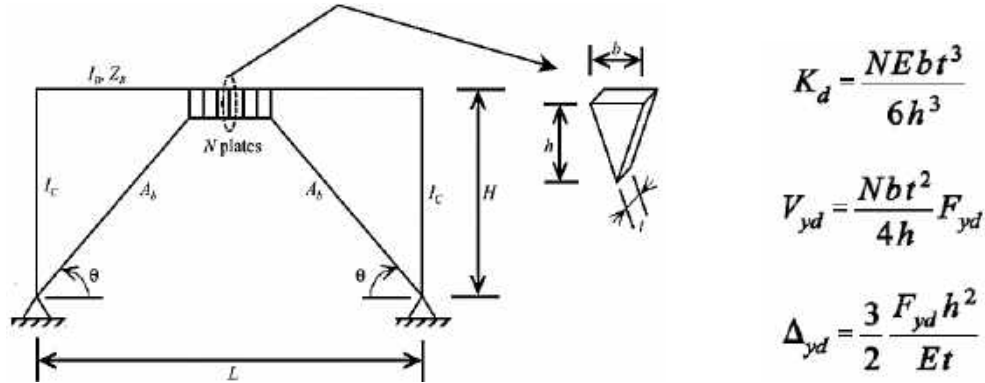


Figura 6.5. Propiedades geométricas para disipadores tipo T-ADAS (Vargas y Bruneau, 2006a)

6.3.3 Panel de Cortante

Para el diseño de disipadores tipo Panel de Cortante, también se utilizaron las formulaciones disponibles en Vargas y Bruneau (2006a). En la figura 6.6 se presentan de manera esquemática un marco con este tipo de disipador usando la misma configuración chevrón que se evalúa a lo largo del presente trabajo. Para este fusible estructural se vigiló que las propiedades geométricas fueran semejantes al de los perfiles comerciales de acero más comunes; su rigidez lateral está en función del módulo de cortante, la longitud, el espesor y altura del alma.

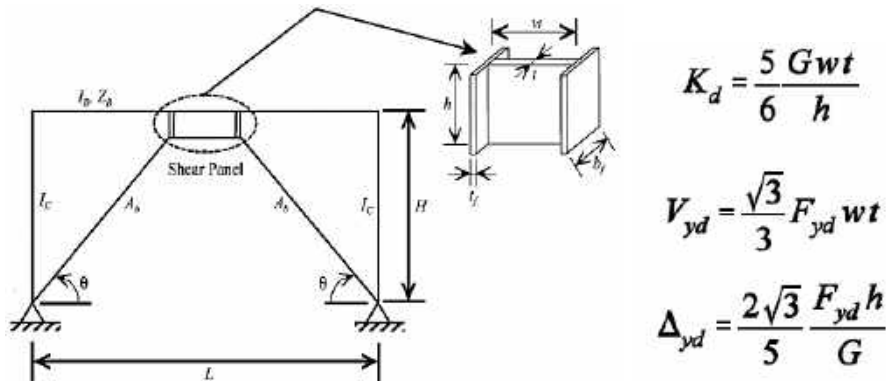


Figura 6.6. Propiedades geométricas para disipadores tipo Panel de Cortante (Vargas y Bruneau, 2006a)

6.3.4 Contravientos restringidos contra pandeo (BRB)

Este elemento consiste en un corazón metálico rodeado de un elemento tubular y relleno de mortero; el corazón metálico se cubre con un material no adherente para que permita la deformación en la dirección axial, es decir, para que disipe energía por histéresis del material. Uno de los primeros estudios experimentales con este tipo de dispositivo es el presentado por Watanabe y colaboradores en 1988, el objetivo de los investigadores era ensayar un contraviento que no fuera susceptible al pandeo (Watanabe *et al* 1988). Se ensayaron cinco especímenes variando la sección transversal, pero manteniendo constante el tamaño del corazón metálico. Además, la carga lateral fue aplicada a través de un actuador de 110 t en cargas cíclicas hasta alcanzar las cargas y distorsiones de diseño (figura 6.7). Se observó que los elementos no presentaban el efecto de pandeo cuando la carga de Euler de la sección tubular era más grande que la resistencia a fluencia del corazón metálico; además, el elemento BRB exhibió ciclos de histéresis estable incluso después de alcanzar su resistencia a fluencia (Watanabe *et al.* 1988).

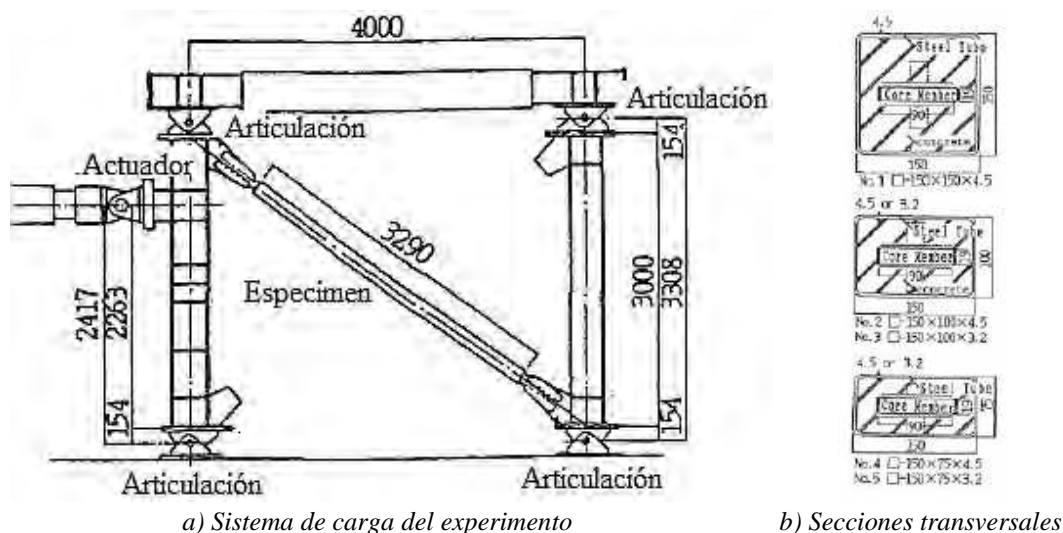


Figura 6.7. Configuración del experimento de BRB (Watanabe *et al.*, 1988)

La forma de idealizar a los elementos BRB varía conforme el nivel de detallado que se requiera analizar. Para el caso específico de la metodología de diseño usada, la cual supone un elemento de soporte y un elemento disipador, se decidió utilizar una idealización en la cual el elemento disipador tiene la longitud del segmento del corazón metálico y la longitud del elemento de soporte está definido por los segmentos de conexión y de transición (figura 6.8). Esta forma de modelado de los elementos BRB la han usado diversos investigadores, dado que la longitud del corazón metálico es la única que actúa en el intervalo no lineal (por ejemplo, Oviedo *et al.* 2010, Sahoo y Chao 2010, Bai y Ou 2016). Para el diseño de estos elementos, se parte de las hipótesis que se enumeran a continuación:

- La relación de rigidez entre el elemento de soporte y el BRB es la misma, por lo que el parámetro de rigidez es $\beta=1.0$.
- La rigidez elástica del elemento BRB, al estar en configuración Chevrón se toma como $K_{DDE} = \frac{EA}{L} \cos^2 \theta$.
- La resistencia a la fluencia del elemento está definida por el esfuerzo de fluencia y el área transversal del corazón metálico empleado $V_{yBRB} = \sigma_y A_{CM}$, dado que es esta parte del BRB la que funge como fusible estructural y, por lo tanto, disipa la energía sísmica.
- Para evitar efectos de pandeo en los BRBs, se aseguró que la carga de Euler en dicho elemento sea 1.5 veces la carga de fluencia del corazón metálico.

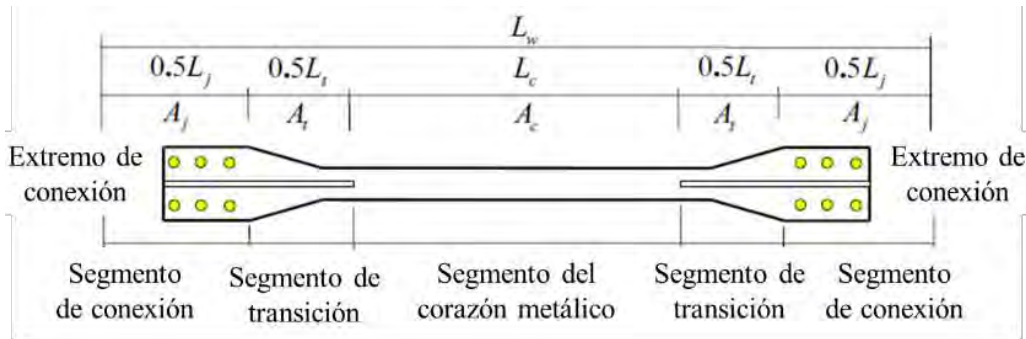


Figura 6.8. Idealización de elemento BRB (adaptado de Bai y Ou 2016)

6.4 Consideraciones generales de análisis lineales

Para todos los modelos en estudio, en el proceso de diseño se efectuaron análisis modales espectrales utilizando el programa MIDAS Gen 2017 (MIDAS 2017). Se tomaron en cuenta efectos de segundo orden P- Δ y efectos de interacción suelo-estructura a partir de una serie de resortes distribuidos en la zona del cajón de cimentación que toman en cuenta la rigidez y el amortiguamiento del suelo donde estarían desplantados los modelos. Los resultados de los modelos con base flexible se comparan también con los resultados considerando la base como rígida, para evaluar la importancia del modelado de la interacción suelo-estructura para las zonas lacustres de la Ciudad de México.

Se consideró el peor escenario posible y por esta razón se ubicaron los modelos en zonas donde existiera mayor probabilidad de que el periodo de la estructura entrara en resonancia con el periodo propio del suelo. Por esta razón los modelos de ocho, 15 y 24 niveles se desplantaron en zona de transición, zona IIIa y zona IIIb respectivamente. A partir de esta consideración, se obtuvieron los espectros de aceleración elásticos y posteriormente se usaron los parámetros Q y R , propuestos en el capítulo cuatro, para reducirlo al espectro de diseño, con los cuales se revisó que las distorsiones de entrepiso fueron menores a las permisibles también propuestas en capítulos anteriores a éste (figura 4.29).

En la figura 6.9 se presentan los espectros elásticos y de diseño utilizados para cada modelo tridimensional en estudio; además, se representan a partir de símbolos los periodos fundamentales para cada dirección de análisis (T_x y T_y), así como también el periodo dominante del suelo (T_s) para donde se supone que estarán desplantados los edificios. En todos los casos se observa que los periodos fundamentales de las estructuras se encuentran en la parte de la meseta del espectro elástico. Asimismo, existe una similitud entre los valores de los periodos fundamentales T_x y T_y con el periodo del sitio T_s , por lo que se esperan respuestas máximas amplificadas por el efecto cercano a resonancia elástica, particularmente para los modelos de ocho niveles, los cuales se discuten en los próximos capítulos. Se previó que la metodología de diseño propuesta fuese resiliente, incluso para los casos más desfavorables que se pudieran presentar en la realidad, que comprende estructuras cercanas a la franja de respuesta resonante elástica con el sitio de interés. También, se modeló una zona de rigidez infinita del 50% de la longitud del nudo de unión de viga-columna, en la cual no se presentarán deformaciones por cortante o flexión (Tena 2007). Finalmente, no se tomó en cuenta la disposición de secciones agrietadas para vigas y columnas, estipulada en la sección 1.4.1 (NTCC-04); es decir, se consideró el momento de inercia grueso de las secciones de concreto para la revisión por resistencia y desplazamiento. Lo anterior tiene su fundamento en los resultados de diversos estudios experimentales de secciones de concreto reforzado ante carga sísmica, donde se ha comprobado que la rigidez efectiva secante es mayor al 50% que se estipula en la norma (Tena 2018). Además, dicho agrietamiento no se presentan en todos los elementos de una estructura y se encuentra localizado en zonas específicas de la sección y no a lo largo de toda ésta.

6.4.1 Combinaciones de carga

Para el diseño de los diferentes elementos estructurales se consideraron una serie de combinaciones de carga las cuáles están resumidas en la tabla 6.2. Se consideraron tres combinaciones de carga vertical asociadas a la condición máxima, a la condición accidental y a la condición media; para efectos prácticos, en los modelos analíticos se usaron las cargas vivas máximas de entrepiso. La reducción de la carga vertical para el caso accidental y media se afectaron directamente en las combinaciones de carga con el cociente correspondiente obtenidos a partir de los valores de la tabla 6.1 de las NTCE-04. Para la condición de carga vertical máxima se usó un coeficiente de 1.4 para todas las condiciones de carga vertical (sección 3.4.a, NTCE-04).

Para la condición de cargas por sismo, se tomó en cuenta la carga viva accidental a partir de coeficientes que reducen las condiciones de carga viva máxima y se agrupan con el nombre carga vertical accidental; dicha condición de carga se asoció a las cargas laterales inducidas por los espectros de diseño en cada dirección de análisis tomando en cuenta efectos ortogonales del 100:30 y sus signos correspondientes (sección 8.7, NTCS-04), que a su vez se multiplicaron por 1.1 (sección 3.4b, NTCE-04), por esta razón existen ocho combinaciones de carga nombradas DIN01 a DIN08, que ya incluyen los factores de amplificación empleados tanto para las cargas verticales como laterales (Tabla 6.2). Para el diseño de las

vigas secundarias, además de la revisión por resistencia, se revisó la deflexión máxima permisible por lo que se tomó en cuenta la carga viva media (sección 6.1.2.c, NTCE-04), con un valor unitario para todas las condiciones de carga vertical (sección 3.4.d, NTCE-04).

Tabla 6.2. Combinaciones de carga para diseño

Carga	PP	CM	CV _{oficina}	CV _{azotea}	CV _{estacionamiento}	Esp-X	Esp-Y
Vertical Media	1	1	0.4	0.15	0.16		
Vertical Máxima	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4		
Vertical Accidental	1	1	0.72	0.7	0.4		
DIN01	1.1	1.1	0.792	0.77	0.44	1.1	0.33
DIN02	1.1	1.1	0.792	0.77	0.44	1.1	-0.33
DIN03	1.1	1.1	0.792	0.77	0.44	0.33	1.1
DIN04	1.1	1.1	0.792	0.77	0.44	-0.33	1.1
DIN05	1.1	1.1	0.792	0.77	0.44	-1.1	-0.33
DIN06	1.1	1.1	0.792	0.77	0.44	-1.1	0.33
DIN07	1.1	1.1	0.792	0.77	0.44	-0.33	-1.1
DIN08	1.1	1.1	0.792	0.77	0.44	0.33	-1.1

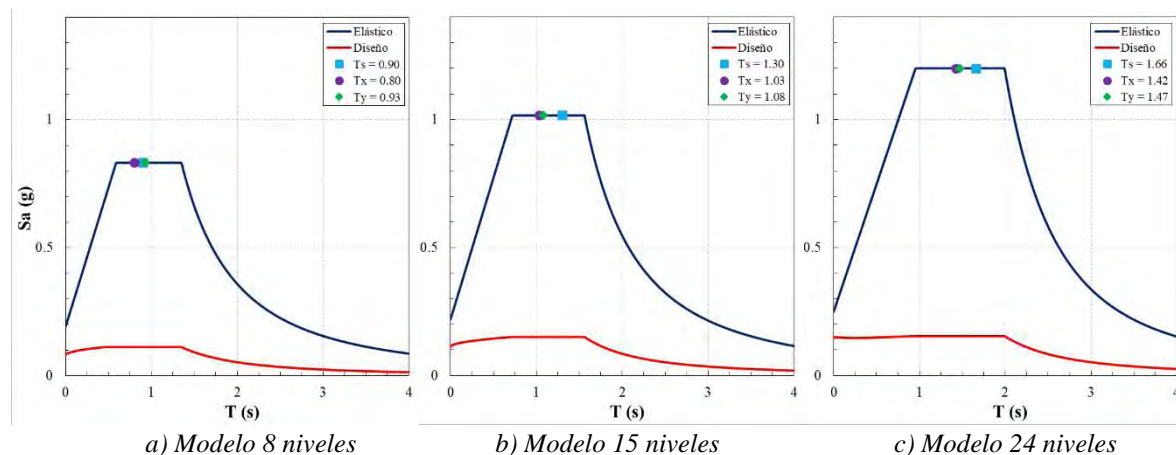


Figura 6.9. Espectros de aceleración para la Ciudad de México

6.4.2 Modelado de interacción suelo-estructura (ISE)

Debido a las condiciones de sitio peculiares que se presentan en la Ciudad de México, generado por la gran capacidad de deformación de sus capas de arcilla, es muy importante considerar los efectos de interacción suelo-estructura, para análisis y diseño de estructuras. Esta interacción consiste en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales producidos en la estructura y el suelo como resultado de su capacidad de deformación ante una excitación sísmica. La interacción modifica las propiedades dinámicas relevantes que tendría la estructura supuesta con base indeformable, así como las características del movimiento del suelo en las cercanías del sistema de cimentación (Avilés y Perez-Rocha 2004). Dicho efecto

es de suma importancia para estructuras flexibles desplantadas en suelos con periodos de sitio predominantemente largos como los de la zona del lago de la Ciudad de México.

El uso del efecto de interacción suelo-estructura se ve reflejado en el incremento o reducción del periodo y el amortiguamiento asociado dependiendo del periodo resonante de la estructura en el espectro de respuesta (Avilés y Perez-Rocha 1998). Esto tiene como consecuencia que los elementos estructurales permanezcan elásticos o sufran daños considerables en función de que las características del terreno coincidan con las de la estructura. Sin embargo, el tomar en cuenta los efectos de la interacción suelo – estructura en modelos provistos de sistemas de control de la respuesta sísmica, provoca que se amplifiquen los cortantes de entrepiso concentrando el daño en los elementos de disipación de energía (González 1990). Por otra parte, los desplazamientos y demandas de resistencia incrementan o reducen dependiendo principalmente de la relación de periodos entre la estructura y el sitio (Vargas *et al.* 1994); sin embargo, estos efectos disminuyen conforme la ductilidad global del sistema es más alto (Avilés y Perez-Rocha 2005). Los efectos de interacción suelo-estructura se emplearon para todos los modelos en estudio debido a que no cumplían con la condición de la ecuación A.13 de las NTCS-04:

$$\frac{T_e H_s}{T_s H_e} > 2.5 \quad (6.1)$$

donde,

H_s : profundidad de los depósitos firmes profundos en el sitio de interés, que se tomará de la figura A.2 de las NTCS-04

H_e : altura efectiva de la estructura calculada a partir de la ecuación A.14 de las NTCS-04

T_e : periodo fundamental de la estructura supuesta con base indeformable.

Tabla 6.3. Parámetros para tomar en cuenta efectos de interacción suelo-estructura

	T_e	T_s	H_s	H_e	$T_e H_s / T_s H_e$
8N	0.93	0.90	26	22.15	1.213
15N	1.08	1.30	51	40.89	1.036
24N	1.47	1.66	61	64.68	0.835

Con el propósito de modelar la interacción suelo-estructura, y considerando el uso del edificio y los requisitos de funcionalidad que les obliga a cumplir el Reglamento para las Construcciones del Distrito Federal, se propusieron dos, tres y cinco niveles de estacionamiento, por debajo del nivel plano de terreno, para los modelos de ocho, 15 y 24 niveles respectivamente. Cada nivel de estacionamiento cuenta con la misma altura de entrepiso utilizado para los modelos con base rígida (400 cm). Se consideró además que los modelos de 15 y 24 niveles estaban cimentados sobre pilas que se desplantan hasta el estrato firme; el cuál varía conforme la zona donde estará desplantado cada modelo (Tabla 6.3). Para el modelo de ocho niveles, se consideraron grupos de pilotes de fricción de 10 metros de longitud.

A partir del periodo de suelo conocido, se supusieron diferentes tipos de estratos con diferentes espesores, módulos de elasticidad, módulos de rigidez al corte y pesos volumétricos representativos de suelos de la Ciudad de México. Se ajustaron los valores antes mencionados para hacer coincidir el periodo del suelo obtenido de la figura A.1 con el valor resultante de la fórmula A.7 de las NTCS-04:

$$T_s = \frac{4}{\sqrt{g}} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{G_i}\right) \left(\sum_{i=1}^N \gamma_i d_i (x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2)\right)} \quad (6.2)$$

Los coeficientes de rigidez y de amortiguamiento se calcularon acorde al Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCS-04). Tales requisitos no consideran los efectos de interacción cinemática y se basan en modelos simplificados que resultan de idealizar la estructura como un oscilador simple y el suelo como un manto blando apoyado sobre un semiespacio indeformable (Avilés y Pérez-Rocha 2004). La interacción suelo-estructura se modeló con un conjunto de resortes y amortiguadores distribuidos en la zona del cajón de cimentación (figura 6.10). Se utilizó el elemento “point spring support” del programa MIDAS Gen, el cual se define en un nodo con la posibilidad de seis grados de libertad, tres componentes traslacionales y tres rotacionales (MIDAS 2017).

En las tablas 6.4 a 6.6 se reportan las propiedades del suelo (módulo de elasticidad, módulo de rigidez al corte, peso volumétrico y profundidad de los diferentes estratos) tomadas en cuenta para el modelado de la interacción suelo – estructura. Dichas propiedades se definieron a partir de un extenso y cuidadoso estudio de mecánica de suelos de un predio ubicado en terrenos blandos de la Ciudad de México (TGC 2010). Para el modelo de ocho entrepisos, se consideraron seis diferentes estratos con sus propiedades correspondientes de la tabla 6.4; mientras que para los modelos de 15 y 24 entrepisos se consideraron ocho estratos. Se observa de las tablas antes mencionadas que la variación principal es la propiedad del módulo de elasticidad del último estrato antes de llegar a terreno firme, esto se hace coincidir el periodo del suelo (T_s) obtenido con las NTCS-04 a partir de los datos especificados y supuestos.

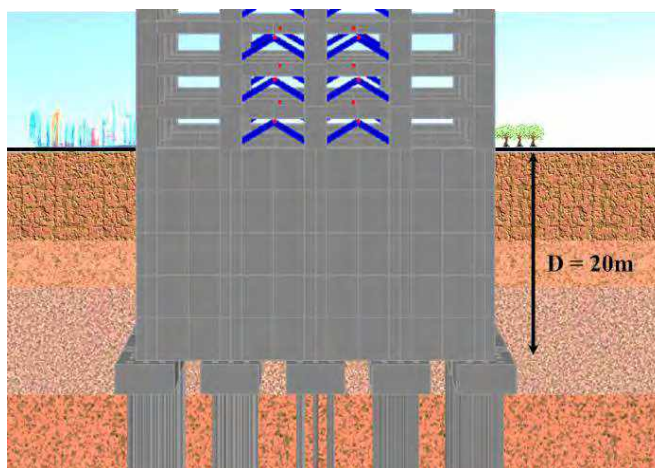


Figura 6.10. Modelado de Interacción Suelo-Estructura

Tabla 6.4. Propiedades del suelo en estudio para zona de transición (modelo de 8 niveles)

Profundidad (m)	E (ton/m ²)	γ (ton/m ³)	G (ton/m ²)
9.5	630	1.19	217.2
14.1	700	1.18	241.4
17.4	1790	1.21	617.2
21.3	2280	1.17	786.2
27.4	1435	1.18	494.8
28.0	5000000	2.1	2000000

Tabla 6.5. Propiedades del suelo en estudio para zona IIIa (modelo de 15 niveles)

Profundidad (m)	E (ton/m ²)	γ (ton/m ³)	G (ton/m ²)
9.5	630	1.19	217.2
14.3	700	1.18	241.4
23.5	1790	1.21	617.2
24.9	2280	1.17	786.2
26.9	1600	1.18	551.7
33.1	530	1.17	182.8
50.2	1530	1.68	527.6
51.0	5000000	2.10	2000000

Tabla 6.6. Propiedades del suelo en estudio para zona IIIb (modelo de 24 niveles)

Profundidad (m)	E (ton/m ²)	γ (ton/m ³)	G (ton/m ²)
9.5	630	1.19	217.2
14.3	700	1.18	241.4
23.5	1790	1.21	617.2
24.9	2280	1.17	786.2
26.9	1600	1.18	551.7
33.1	530	1.17	182.8
50.8	1070	1.68	369.0
61	5000000	2.10	2000000

A partir de las características de los estratos mencionados en las tablas 6.4 a 6.6 y de las propiedades geométricas y mecánicas de los pilotes y losas de cimentación, se procedió a calcular la rigidez y el amortiguamiento para las cimentaciones en cuestión de cada uno de los modelos evaluados. Debido a que la cimentación está compuesta por un sistema combinado, se utilizaron las fórmulas del apéndice A de las NTCS-04 (Tabla A.2) para cimentaciones someras y pilotes. Para la zona del cajón de cimentación se distribuyó a lo largo de todo el perímetro de la dirección en cuestión, la rigidez y el amortiguamiento calculados. Por ejemplo, en la figura 6.11 se aprecia el modelado del cajón de cimentación

para el modelo de ocho entrepisos donde se modelaron dos niveles de sótano en la zona del cajón de cimentación. La forma de representar la rigidez y el amortiguamiento en MIDAS Gen es a partir de un hexágono que toma en cuenta hasta seis grados de libertad, el cual está iluminado cada sección en color amarillo, para la dirección donde tomará en cuenta los parámetros antes mencionados.

En la figura 6.11b se aprecia el nivel donde estará la losa de cimentación y se observan nueve nodos en cada eje de la dirección x , lo que hace un total de 36 nodos entre los que se repartirá el valor de K_v calculado para el cajón de cimentación (tabla 6.6). Para los resortes que actúan en la dirección x (figura 6.11c), se aprecian ocho nodos en cada entrepiso de cimentación, lo que hace un total de 24 nodos entre los que se repartirá el valor de K_{rx} . Los resortes que actúan en la dirección y (figura 6.11d), se aprecian 18 nodos en cada entrepiso de cimentación, lo que hace un total de 54 nodos entre los que se repartirá el valor de K_{ry} . Finalmente, el valor de K_x se obtuvo suponiendo un círculo equivalente a la superficie de desplante, por lo que su rigidez se distribuyó entre la suma de los nodos actuantes en la dirección x y y , por lo que para el modelo de ocho entrepisos da un total de 78 nodos. Este procedimiento se aplicó de manera similar para los modelos de 15 y 24 entrepisos, donde al aumentar el número de niveles de sótano, la cantidad de nodos entre los que se distribuyó la rigidez y el amortiguamiento del cajón de cimentación se incrementaron también.

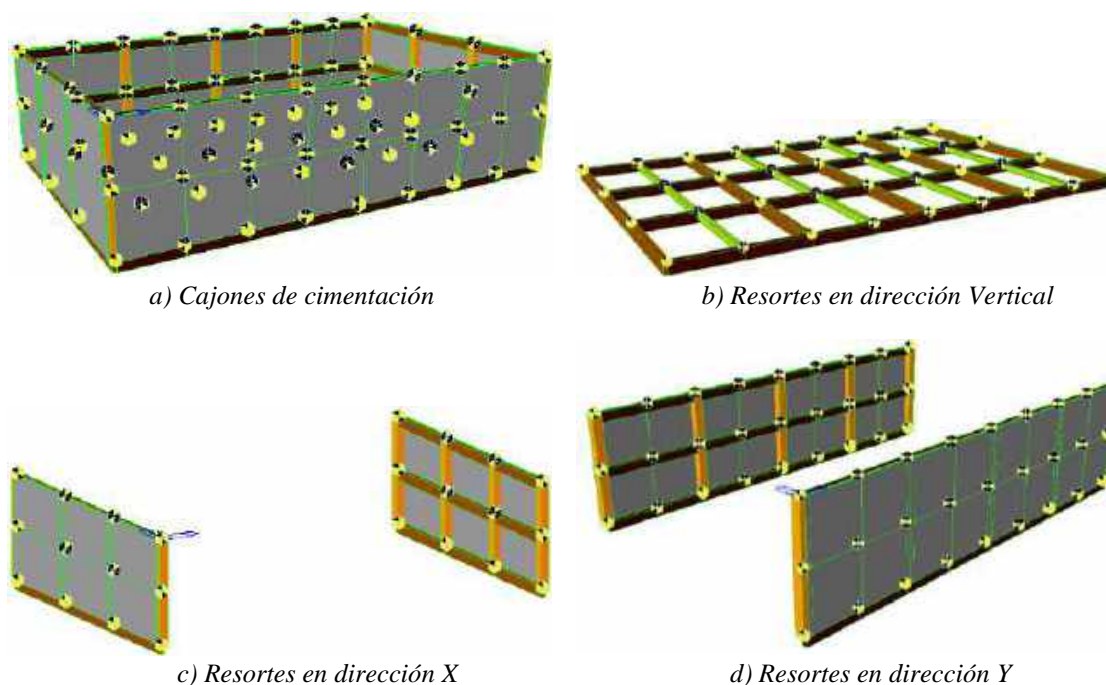


Figura 6.11. Modelado de Interacción Suelo-Estructura para cajón de cimentación, modelo de 8 entrepisos

El modelado de los pilotes de cimentación se realizó a partir de un resorte en la base de cada columna para representar el grupo de pilotes (figura 6.12). En la tabla A.2 de las NTCS-04 se tienen las fórmulas para calcular la rigidez vertical (K_v) y horizontal (K_x) de cada pilote de manera individual, por lo que en las tablas 6.7 a 6.9 se reporta el valor del grupo de pilotes para cada modelo de estudio.

Para el cálculo de la rigidez rotacional, se presentan diferencias entre los modelos. Para el modelo de ocho entrepisos, se consideró pilotes de fricción, por lo que su contribución a la rigidez rotacional es similar a los especificados para el caso de zapatas (NTCS-04). Para los modelos de 15 y 24 entrepisos, se consideraron pilotes de punta, los cuáles se desplantaban hasta el estrato firme y dado que la superestructura estaría desplantada en la zona III de la Ciudad de México, se empleó la fórmula A.32 de las NTCS-04:

$$K_r = \frac{1}{\frac{1}{43GR_r^3} + \frac{1}{\sum x_i^2 \sum K_{vi}}} \quad (6.3)$$

donde,

G : módulo de rigidez medio del suelo

R_r : radio del círculo equivalente a la superficie de desplante para el modo de rotación

x_i : distancia en la dirección de análisis entre el centroide de la zapata o pilote i y el eje centroidal de la planta de cimentación

K_{vi} : rigidez en traslación vertical.

Como se aprecia de la ecuación 6.3, el cálculo de la rigidez rotacional depende de la distancia entre el centroide del pilote y el eje centroidal de la planta de cimentación. Por eso en las tablas 6.8 y 6.9 aparecen los valores de K_r acompañados de subíndices que indican la dirección de la rotación, así como el valor de la distancia antes mencionada. Para los modelos de 15 y 24 entrepisos se hacen diferencias entre el grupo de pilotes que soportan la descarga de las columnas exteriores y de las columnas interiores, debido a que las secciones transversales y la descarga axial varían entre éstas. Caso contrario, para el modelo de ocho niveles, se diseñaron los grupos de pilotes de fricción por igual, dado que no existía mucha diferencia entre los elementos mecánicos de descarga para las columnas de la periferia y las interiores. El resumen de las propiedades geométricas y mecánicas de los elementos estructurales que componen el sistema de cimentación se detalla en secciones posteriores a esta.

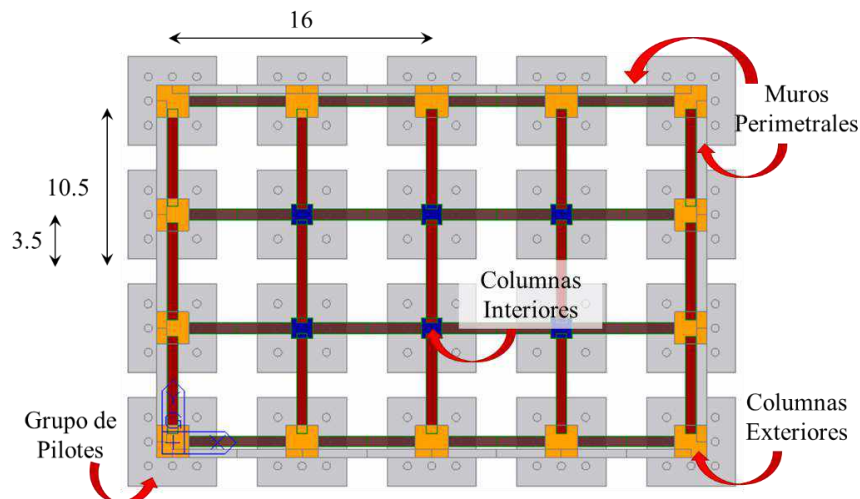


Figura 6.12. Modelado de Interacción Suelo-Estructura para pilotes, modelo de 24 entrepisos

Tabla 6.7. Rigidez y amortiguamiento por cimentación (modelo de 8 niveles)

		Rigidez (ton/m)	Amortiguamiento	Nodos
Cajón de cimentación	K_x	38,267.33	581.62	78
	K_v	62,788.19	757.15	36
	K_{ry}	6,350,638.42	79,153.47	24
	K_{rz}	10,587,331.93	133,116.62	54
Pilotes de fricción	K_x	9,228.64	89.03	
	K_v	129,600.63	0.00	
	$Kr_y (16)$	33,177,761.72	0.00	
	$Kr_z (10.5)$	14,288,469.65	0.00	
	$Kr_y (8)$	8,294,440.43	0.00	
	$Kr_z (3.5)$	1,587,607.74	0.00	

Tabla 6.8. Rigidez y amortiguamiento por cimentación (modelo de 15 niveles)

		Rigidez (ton/m)	Amortiguamiento	Nodos
Cajón de cimentación	K_x	41,622.76	889.17	104
	K_v	58,945.23	800.59	36
	K_{ry}	8,723,113.14	122,052.24	32
	K_{rz}	14,268,388.83	201,151.81	72
Pilotes de punta exteriores	K_x	13,570.58	147.45	
	K_v	791,171,460.75	0.00	
	$Kr_y (16)$	101,402,821,689.67	0.00	
	$Kr_z (10.5)$	71,011,178,841.07	0.00	
	$Kr_y (8)$	40,529,222,020.96	0.00	
	$Kr_z (3.5)$	9,452,030,315.49	0.00	
Pilotes de punta interiores	K_x	11,761.37	127.79	
	K_v	758,427,629.98	0.00	
	$Kr_y (8)$	39,175,445,537.54	0.00	
	$Kr_z (3.5)$	9,070,132,329.18	0.00	

Tabla 6.9. Rigidez y amortiguamiento por cimentación (modelo de 24 niveles)

		Rigidez (ton/m)	Amortiguamiento	Nodos
Cajón de cimentación	K_x	140,074.70	4,785.51	156
	K_v	177,388.18	2,884.08	36
	K_{ry}	33,728,499.62	564,152.10	48
	K_{rz}	53,929,954.28	908,492.61	108
Pilotes de punta exteriores	K_x	36,622.76	476.35	
	K_v	872,983,095.16	0.00	
	$Kr_y(16)$	106,394,756,699.50	0.00	
	$Kr_z(10.5)$	76,876,332,620.56	0.00	
	$Kr_y(8)$	43,815,912,248.94	0.00	
	$Kr_z(3.5)$	10,402,806,174.32	0.00	
Pilotes de punta interiores	K_x	21,973.65	285.81	
	K_v	733,298,091.23	0.00	
	$Kr_y(8)$	38,121,085,243.21	0.00	
	$Kr_z(3.5)$	8,776,509,919.08	0.00	

6.5 Diseño de columnas para edificios esbeltos

De los mapeos de fluencia presentados en el capítulo cuatro, se aprecia que el mecanismo de fluencia no es el más adecuado en los modelos más esbeltos estudiados, debido a que se observó desarrollo de no linealidad incipiente para ciertas columnas de la periferia cuando los disipadores desarrollan su fluencia máxima, para ciertos balances de rigidez (figuras 4.22a y 4.23a). Este efecto se ha evaluado antes para marcos de concreto dúctiles con contraventeo metálico, pero sin el uso de disipadores de energía (Godínez 2010, Godínez y Tena 2011), donde se observó que para modelos muy flexibles, los contravientos transmiten una demanda de carga axial muy grande a las columnas conectadas a este sistema. Por ende, se propusieron utilizar factores de amplificación de la carga axial para que los nuevos elementos mecánicos cubrieran las demandas de diseño y, como consecuencia, disminuyeran la axialización de las columnas en cuestión. Para tal efecto, y con el propósito de mitigar la participación no lineal de columnas conectadas al sistema contraviento-disipador, se decidió incrementar en un 30% la carga axial de las columnas que reciben la descarga axial de los contravientos para aquéllos marcos con relación de esbeltez $H/L > 2.5$, según lo propuesto en el estudio de Godínez (figura 6.13). Con esto, se busca que el uso de esta propuesta logre hacer que todas las columnas presenten comportamiento elástico, incluso para los marcos en la dirección “y”, que presenta una relación de esbeltez $H/L = 3.88$.

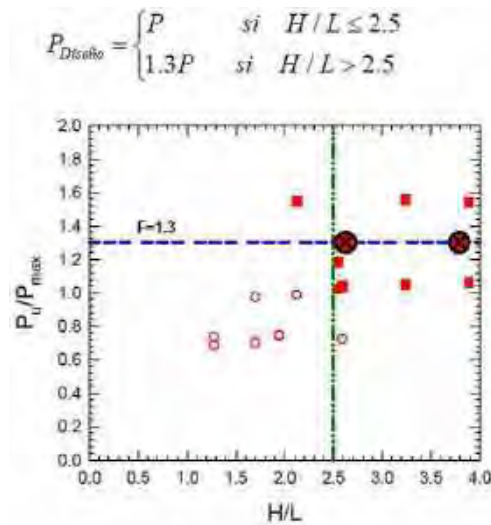


Figura 6.13. Propuesta para el incremento de la carga axial de diseño en columnas de esquina o borde de los primeros entrepisos en estructuras esbeltas (Godínez 2010)

Aumentar la carga axial de las columnas de borde se ve reflejado en el diseño con el aumento en su sección transversal y, por ende, cambios en los balances de rigidez entre los sistemas estructurales involucrados (marco, contraviento y dissipador). Por esta razón, se replantea el diseño original de todos los elementos estructurales para hacer cumplir los balances α y β , para realizar una comparativa de diseño acorde al límite de distorsión última permisible, además de respetar los balances de rigidez teóricos propuestos al inicio del proceso de diseño. En la figura 6.14 se presenta la comparativa de envolventes de distorsiones últimas sin el factor de seguridad de 1.3 (figura 6.14a) y con el factor de seguridad de 1.3 (figura 6.14b), para el modelo más esbelto estudiado en este capítulo. Se aprecia de éstas que las magnitudes y formas de la envolvente de distorsión cambian producto del proceso de diseño y del incremento de la carga axial. De manera más puntual, en la figura 6.15 se observan las diferencias de secciones transversales y armados, consecuencia del uso del factor de seguridad de 1.3 propuesto en Godínez (2010), donde se observa que existe un incremento en la sección transversal del 13% en promedio e incluso, el aumento en el diámetro del estribo utilizado en la sección de los primeros entrepisos, donde pasa de usarse ramas de estribo de 9.5 mm ó 3/8" (color azul) a ramas de estribos de 12.7 mm o 1/2" (color verde).

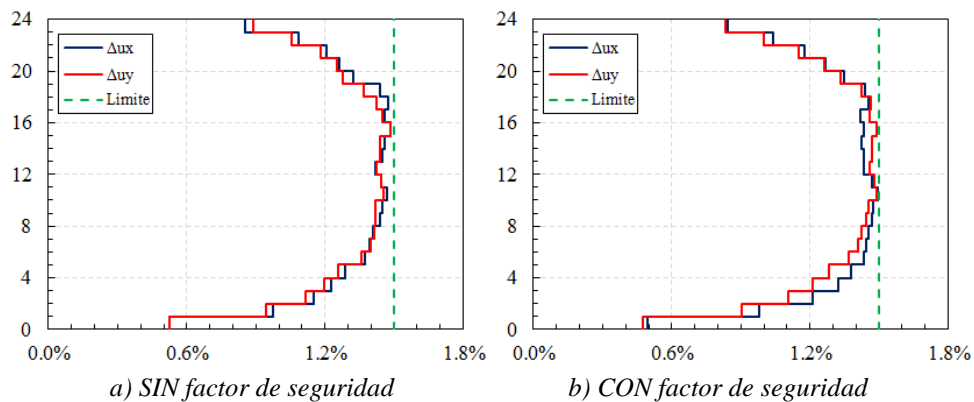
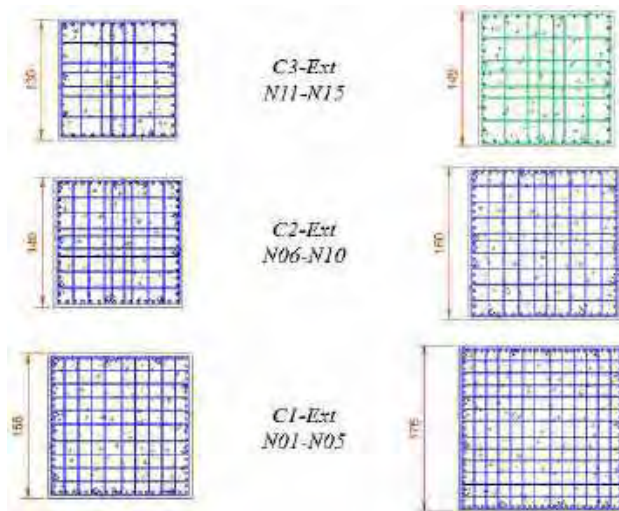


Figura 6.14. Envolventes de distorsión última de entrepiso

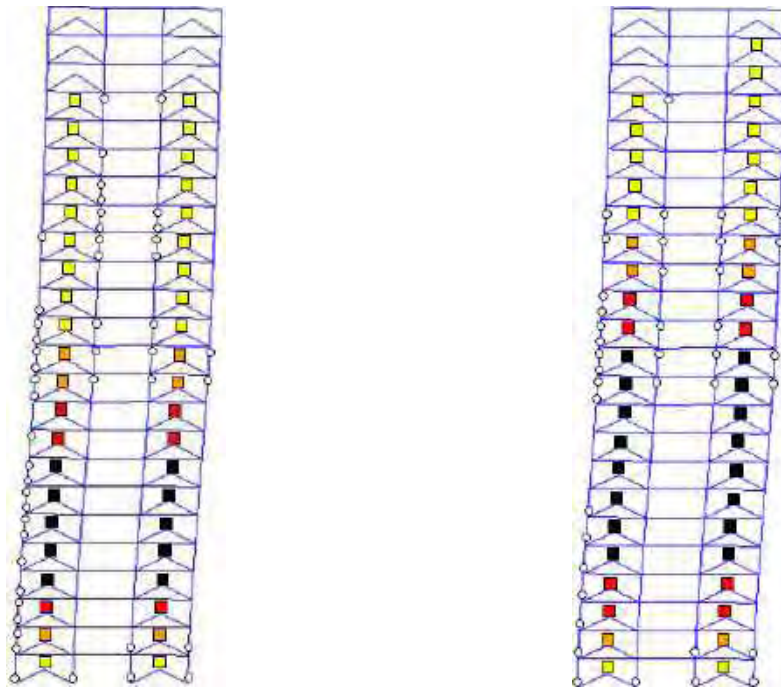


a) SIN factor de seguridad

b) CON factor de seguridad

Figura 6.15. Armado de columnas exteriores

En la figura 6.16 se tiene el mapeo de fluencias a la ductilidad última que pueden desarrollar los disipadores. Para este mapeo de fluencia en particular sólo se presentan las fluencias inelásticas en disipadores y columnas, con el propósito de observar las diferencias de incrementar la carga axial en el proceso de diseño. Se aprecia de esta figura que usar el incremento de carga axial antes mencionado no es suficiente para que las columnas se comporten elásticamente. Aunque se reducen las magnitudes de rotación y en algunos casos desaparecen las fluencias inelásticas, debido al incremento de la sección transversal y del acero de refuerzo, se continúan presentando fluencias incipientes en columnas.



a) SIN factor de seguridad

b) CON factor de seguridad

Figura 6.16. Mapeo de fluencias inelásticas de columnas a la fluencia última de los disipadores

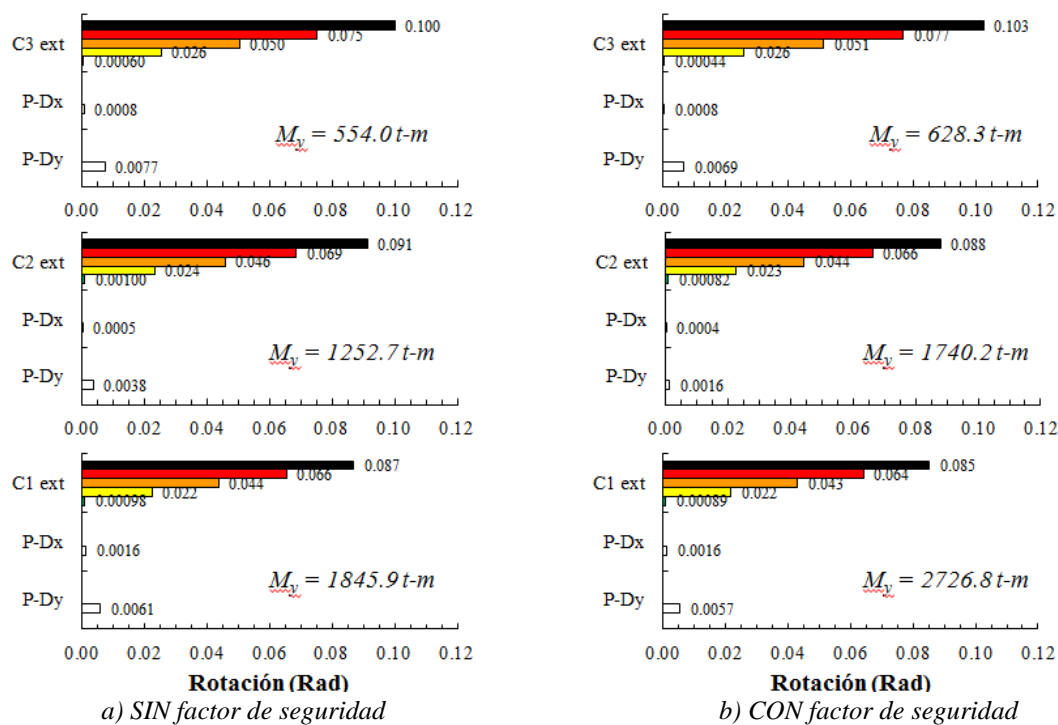


Figura 6.17. Código de colores de fluencias inelásticas de columnas exteriores

En la figura 6.17, se presentan los momentos flexionantes de fluencia para las columnas de los primeros niveles, así como la magnitud de rotación donde se presentan los cambios en el código de color para representar el nivel de daño a las columnas. A pesar que existe un incremento notorio en la resistencia de las columnas con la adición de este parámetro, la magnitud de rotación donde las columnas empiezan a fluir disminuye conforme las secciones transversales son más grandes para soportar la demanda de carga axial. Por esta razón es importante valorar la magnitud de incremento en la carga axial para que las columnas se comporten de manera elástica, como es lo deseable en el diseño resiliente para este tipo de estructuras.

Aunque la propuesta de Godínez mitiga la participación no lineal de las columnas, ésta se formuló a partir de un estudio paramétrico de marcos de concreto reforzado con contravientos metálicos sin disipadores de energía. Por esta razón, se propone tomar en cuenta una propuesta de diseño para las columnas con descarga axial del sistema contraviento-disipador. De manera esquemática, se aprecian en la figura 6.18 las condiciones de carga para el diseño de dichas columnas. Para el diseño de éstas, se considera una nueva combinación de carga que tome en cuenta la contribución de la carga gravitacional generada por el peso propio, carga muerta y carga viva accidental; además, se considera el aporte del cortante de diseño de los disipadores V_{uDDE} , que se proyectará primero a los contravientos (P_{Diag}) y posteriormente como carga axial a la columna en cuestión (P_{Disip}).

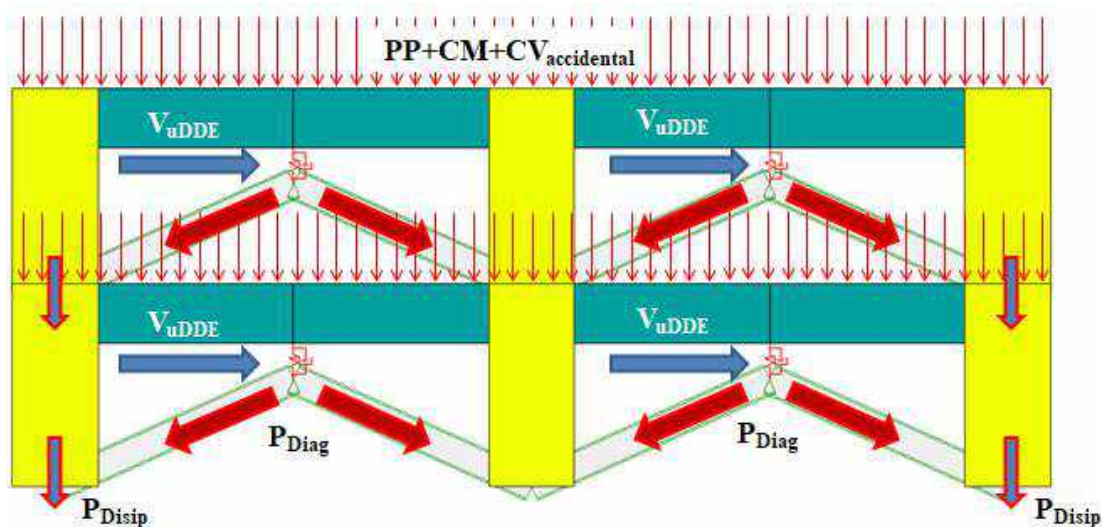


Figura 6.18. Condición de carga para diseño de columnas conectadas al sistema contraviento-disipador

Se revisaron los marcos planos evaluados en el capítulo cuatro con el propósito de localizar aquellos modelos en los que las columnas presentaran participación no lineal. Se encontraron que los modelos más esbeltos evaluados (20 y 25 niveles), con los balances de rigidez de $\alpha=0.25$ (cuando el sistema del marco es más flexible), presentaban fluencias inelásticas incipientes en algunas columnas de la periferia de los primeros entrepisos.

En las gráficas que se presentan en la figura 6.19 se tienen los diagramas de interacción de las columnas usadas en los primeros diez niveles para los marcos planos de 20 y 25 niveles del capítulo cuatro (figuras 4.22a y 4.23a). Los rombos en azul representan los valores de diseño a flexocompresión y a flexotensión del diseño original. Los rombos en rojo representan los valores de diseño a cubrir con la combinación de carga propuesta en párrafos anteriores (figura 6.18). Se aprecia que en la mayoría de los casos, para el primer entrepiso, la carga axial con la nueva combinación de carga son mayores en un 45% aproximadamente (rombos en rojo), por lo que requerirán mayor sección transversal y mayor acero de refuerzo. Se observa que para la columna usada en los entrepisos del 6 al 10 para el modelo con 20 entrepisos (figura 6.19b), la magnitud a flexocompresión es muy similar con cualquier procedimiento de diseño. Derivado de estas observaciones, el usar un mismo factor de amplificación de carga axial podría resultar en el sobredimensionamiento de las columnas de los entrepisos superiores en modelos esbeltos. Por último, la variación del parámetro β (relación de rigidez entre disipador y contraviento), no hace una diferencia notoria en la obtención de la carga axial para el diseño de las columnas (figura 6.19a y 6.19c).

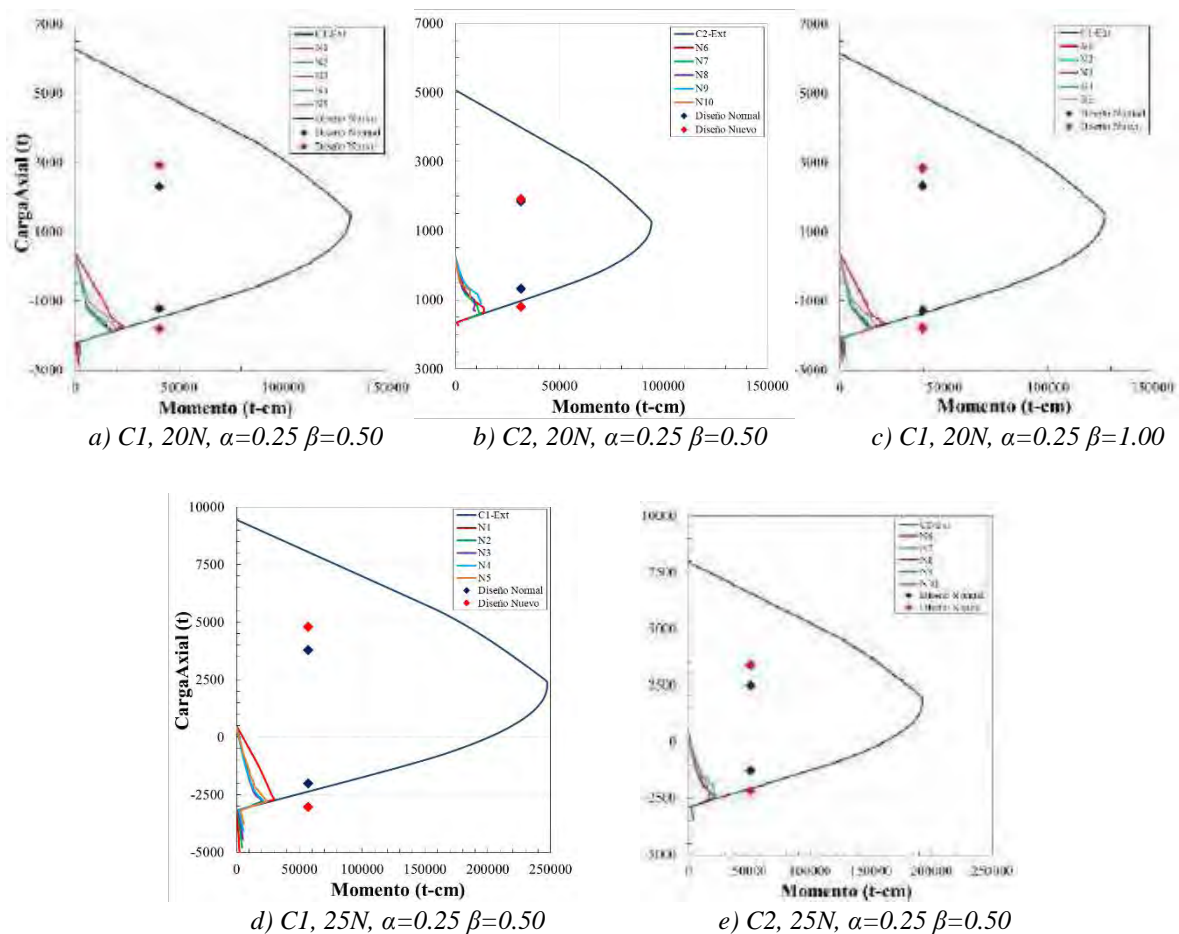


Figura 6.19. Diagramas de interacción de columnas con fluencias incipientes para marcos planos con $H/L > 2.5$

Además del diagrama de interacción y los valores de diseño que se indican en la figura 6.19, se grafica el comportamiento momento-carga axial, que se obtiene de sus respectivos análisis estáticos no lineales, de la primera columna de la periferia izquierda (columna de esquina), para cada uno de los entrepisos correspondientes. Para la columna empleada en los primeros cinco entrepisos (figura 6.19a, 6.19c y 6.19d), se observa el comportamiento a flexotensión, y como su comportamiento no lineal sigue la trayectoria del diagrama de interacción hasta que se sale de éste.

6.6 Resumen de los diseños finales de los edificios

6.6.1 Propiedades dinámicas finales de los edificios en base rígida

En la tabla 6.10 se resumen las propiedades dinámicas correspondientes a los primeros tres modos de vibración de los edificios evaluados con base rígida, donde ya se incluye el impacto de la excentricidad accidental conforme a las NTCS-04. La excentricidad accidental se modeló trasladando el centro de masas teórico de cada nivel, dado que no únicamente genera momentos torsionantes, sino que acopla los modos y, por ende, modifica también tanto los periodos de vibración como los factores de participación modal de los mismos. Se aprecia de

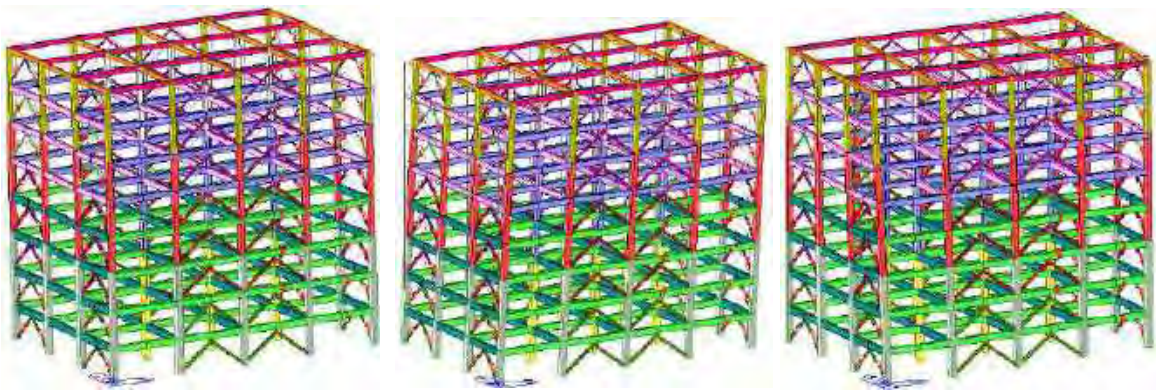
ésta que el modo fundamental en todos los modelos está asociada para la dirección y o NS (figura 6.20a). De manera general, conforme el modelo incrementa su relación de esbeltez, el porcentaje de participación modal disminuye también; aunque es importante mencionar que para todos los modelos se consideraron la cantidad de modos suficientes para asegurar más del 90% de la participación modal. Por ejemplo, fueron ocho modos para el modelo de ocho niveles, nueve modos para el modelo de 15 niveles y trece modos para el modelo de 24 niveles. Sin embargo, se utilizaron al menos el doble de las cantidades antes mencionadas, para asegurar más del 95% de participación modal. Asimismo, se observa que la dirección x o EW (figura 6.20b) es la que tiene mayor participación modal para todos los casos estudiados con base rígida, aunque la diferencia de participación modal entre los modos fundamentales se reduce conforme el edificio aumenta en altura, y se hace más flexible. Finalmente, el tercer modo de vibrar es el modo asociado a rotación y se encuentra desacoplado y razonablemente alejado de los modos de traslación lateral, al tratarse de edificios torsionalmente rígidos por tener los marcos más rígidos en su perímetro, que es una condición de diseño favorable desde esta óptica.



Figura 6.20. Modos de vibrar representativos de edificios regulares con disipadores de energía

Tabla 6.10. Características dinámicas de los edificios con base rígida

Modelo	Modo	Periodo T(s)	Participación Modal			H (m)	Periodo Estimado	T _{modelo} / T _{estimado}
			EW	NS	θ_z			
8N BR	1	0.928	0.00	74.35	0.16	32	0.64	1.45
	2	0.798	76.45	0.01	0.21	32	0.64	1.25
	3	0.590	0.21	0.15	75.21	-	-	-
15N BR	1	1.080	0.06	69.12	0.26	60	1.20	0.90
	2	1.030	72.36	0.06	0.15	60	1.20	0.86
	3	0.750	0.16	0.23	70.80	-	-	-
24N BR	1	1.477	0.07	64.88	0.22	96	1.92	0.77
	2	1.425	68.76	0.07	0.11	96	1.92	0.74
	3	1.015	0.12	0.18	68.51	-	-	-

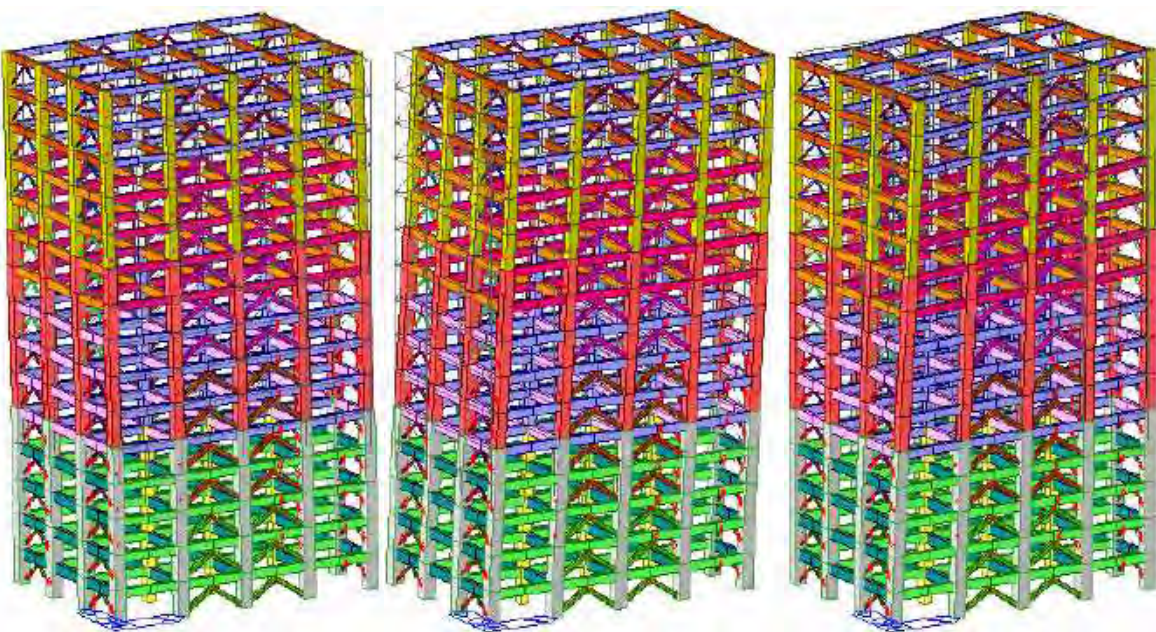


a) Modo de Traslación NS

b) Modo de Traslación EW

c) Modo de Rotación

Figura 6.21. Modos de vibrar para modelo de ocho entrepisos con base rígida



a) Modo de Traslación NS

b) Modo de Traslación EW

c) Modo de Rotación

Figura 6.22. Modos de vibrar para modelo de 15 entrepisos con base rígida

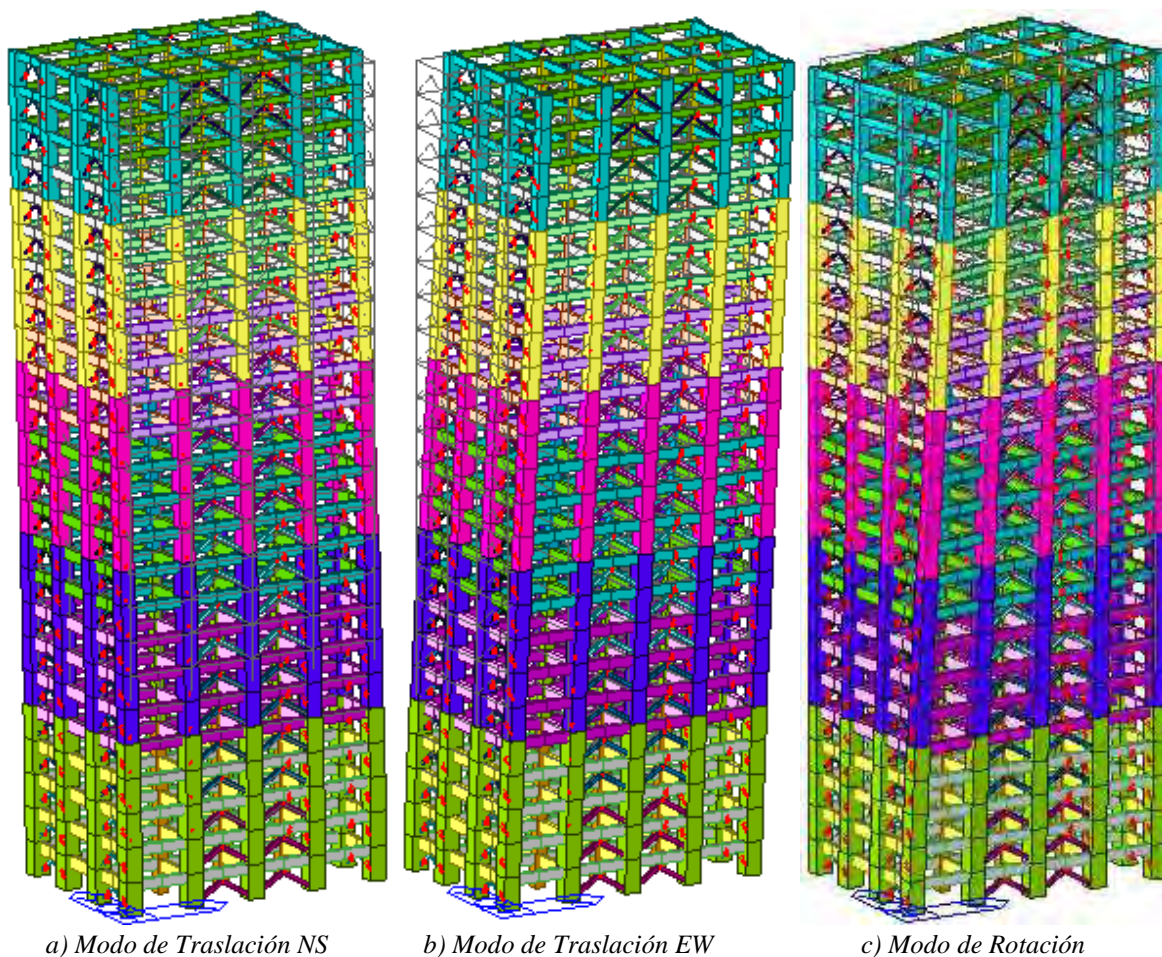


Figura 6.23. Modos de vibrar para modelo de 24 entrepisos con base rígida

En las figuras 6.21 a 6.23 se presentan las vistas isométricas de todos los modelos evaluados; en éstas se aprecia la forma de vibrar representativa de los tres primeros modos. Asimismo, se observa de estas figuras los cambios de sección para vigas, columnas y contravientos conforme aumenta en altura cada uno de los edificios estudiados. De manera gráfica se aprecia también que las secciones de las columnas son más robustas para el modelo de 24 entrepisos y es el resultado de proveer con mayor rigidez al sistema del marco desde su conceptualización de diseño y de la combinación de carga especial impuesta para edificios esbeltos. Finalmente, en la última columna de la tabla 6.10 se obtiene la relación entre el periodo obtenido con el modelo analítico y el estimado con la fórmula propuesta con la ecuación 4.1, obteniendo una sobreestimación inicial del periodo para todos los casos, dado que en los modelos se consideró que los diafragmas son rígidos, dado que el sistema de piso diseñado fue una losa maciza de concreto reforzado perimetralmente apoyada con espesores de $t=10$ cm (Apéndice B). Para los claros considerados de 8 m y 7 m respectivamente, y la relación de aspecto de la planta ($L_1/L_2=1.52$ m), esta hipótesis es adecuada para este sistema de piso, con base en los resultados de estudios con elementos finitos (Tena *et al.* 2013, Tena-Colunga *et al.* 2015).

6.6.2 Propiedades dinámicas finales de los edificios considerando ISE

En la tabla 6.11 se resumen las propiedades dinámicas de los modelos estudiados con interacción suelo-estructura. De manera general se aprecia que los periodos fundamentales para cada dirección de análisis son mayores en comparación con los obtenidos para los modelos con base rígida, es decir, el modelo se flexibiliza cuando se toma en cuenta la rigidez y el amortiguamiento del suelo. Además, la participación modal para cada modelo se reduce con respecto al edificio con la misma cantidad de entresijos pero con base rígida; no obstante de manera general, se tiene una reducción del 15% en la participación modal. Conjuntamente, se aprecia que la participación modal asociada a la rotación es mayor y para los modelos de 15 y 24 niveles es incluso mayor que para los de traslación.

Tabla 6.11. Características dinámicas de los edificios con base flexible

Modelo	Modo	Periodo T(s)	Participación Modal			H (m)	Periodo Estimado	T _{modelo} / T _{estimado}
			EW	NS	θ_z			
8N ISE	1	1.086	0.00	62.92	0.11	32	0.64	1.70
	2	0.909	65.72	0.00	0.17	32	0.64	1.42
	3	0.675	0.17	0.08	67.35	-	-	-
15N ISE	1	1.238	0.02	64.69	0.25	60	1.20	1.03
	2	1.156	67.19	0.03	0.18	60	1.20	0.96
	3	0.868	0.17	0.19	70.74	-	-	-
24N ISE	1	1.672	0.01	55.76	0.12	96	1.92	0.87
	2	1.548	57.57	0.01	0.08	96	1.92	0.81
	3	1.095	0.07	0.09	59.51	-	-	-

En las figuras 6.24 a 6.26 se aprecian las vistas isométricas de los modelos evaluados con base flexible; en éstas se aprecia la forma de vibrar representativa de los tres primeros modos. Igualmente, se observa de estas figuras los niveles de sótanos considerados para cada modelo en particular, donde se incluyó y modelaron los muros perimetrales, la losa de cimentación, vigas y columnas de los niveles de sótano, que componen al cajón de cimentación considerado. Todos los elementos antes mencionados fueron diseñados para soportar las demandas de resistencia impuestas a las diversas combinaciones de carga de los distintos casos analizados.

En las tablas 6.12 a 6.14 se resume el peso de los modelos para cada entresijo en la etapa último de diseño, incluyendo los niveles de los sótanos. Además, se aprecia en dos columnas por separado el peso por acción de la carga de entresijo y por el peso propio de los elementos estructurales. Se aprecian tres diferentes magnitudes por carga de entresijo que engloban la carga muerta, carga viva y el peso propio de la losa de 10 cm; la variación en magnitud va ligada al tipo de uso de cada entresijo (azotea con pendiente menor de 5%, oficinas y estacionamiento).

En la columna del peso propio de los elementos estructurales se incluye el peso propio de vigas, columnas, contravientos, muros y disipadores (ADAS y BRB). En general, se aprecia que conforme el modelo aumenta en altura, el peso propio de los elementos estructurales tiende a disminuir. Además, se aprecia que en los niveles de sótanos el peso propio de los elementos estructurales aumenta entre un 16% a un 20%, por efecto de los muros perimetrales en dichos entrepisos a comparación del nivel cero.

Tabla 6.12. Pesos por entrepiso del modelo de 8 niveles (unidades: t – m)

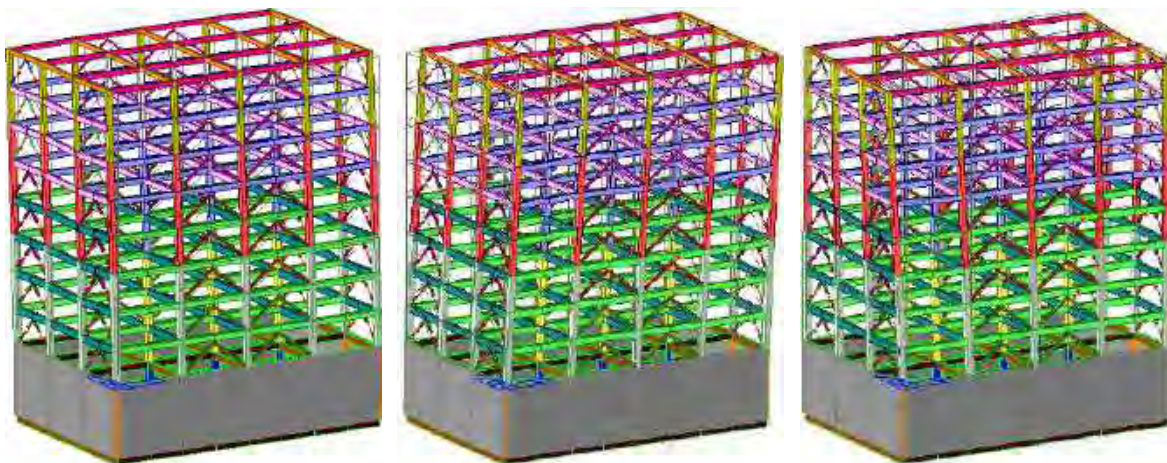
Entrepiso	Altura	Peso por carga	Peso propio	Suma
N8	32	313.34	127.28	440.62
N7	28	467.90	204.07	671.98
N6	24	467.90	212.34	680.24
N5	20	467.90	221.04	688.94
N4	16	467.90	256.62	724.52
N3	12	467.90	268.04	735.95
N2	8	467.90	280.79	748.69
N1	4	467.90	279.87	747.77
N0	0	467.90	332.27	800.17
S0	-4	400.70	385.06	785.76
S1	-8	400.70	290.45	691.15
Total		4857.98	2857.82	7715.80

Tabla 6.13. Pesos por entrepiso del modelo de 15 niveles (unidades: t – m)

Entrepiso	Altura	Peso por carga	Peso Propio	Suma
N15	60	313.34	292.10	605.44
N14	56	467.90	393.68	861.58
N13	52	467.90	396.50	864.40
N12	48	467.90	481.11	949.01
N11	44	467.90	484.66	952.57
N10	40	467.90	518.12	986.02
N9	36	467.90	548.79	1016.69
N8	32	467.90	588.55	1056.45
N7	28	467.90	590.86	1058.76
N6	24	467.90	594.43	1062.33
N5	20	467.90	623.51	1091.41
N4	16	467.90	674.76	1142.66
N3	12	467.90	677.05	1144.95
N2	8	467.90	680.33	1148.23
N1	4	467.90	680.33	1148.23
N0	0	467.90	837.52	1305.43
S1	-4	400.70	987.35	1388.05
S2	-8	400.70	987.35	1388.05
S3	-12	400.70	684.82	1085.52
Total		8534.02	11721.80	20255.82

Tabla 6.14. Pesos por entrepiso del modelo de 24 niveles (unidades: $t - m$)

Entrepiso	Altura	Peso por carga	Peso Propio	Suma
N24	96	313.34	357.89	671.24
N23	92	467.90	518.18	986.08
N22	88	467.90	519.44	987.35
N21	84	467.90	596.91	1064.81
N20	80	467.90	635.45	1103.35
N19	76	467.90	677.75	1145.65
N18	72	467.90	677.75	1145.65
N17	68	467.90	758.63	1226.53
N16	64	467.90	761.99	1229.89
N15	60	467.90	799.89	1267.79
N14	56	467.90	835.74	1303.65
N13	52	467.90	911.81	1379.72
N12	48	467.90	911.67	1379.57
N11	44	467.90	915.01	1382.91
N10	40	467.90	957.27	1425.18
N9	36	467.90	999.68	1467.59
N8	32	467.90	1046.58	1514.48
N7	28	467.90	1047.23	1515.14
N6	24	467.90	1050.16	1518.07
N5	20	467.90	1091.81	1559.72
N4	16	467.90	1122.20	1590.11
N3	12	467.90	1122.57	1590.48
N2	8	467.90	1123.09	1590.99
N1	4	467.90	1123.09	1590.99
N0	0	467.90	1407.09	1874.99
S1	-4	400.70	1684.09	2084.79
S2	-8	400.70	1684.09	2084.79
S3	-12	400.70	1684.09	2084.79
S4	-16	400.70	1684.09	2084.79
S5	-20	400.70	1121.81	1522.52
Total		13546.56	29827.04	43373.60

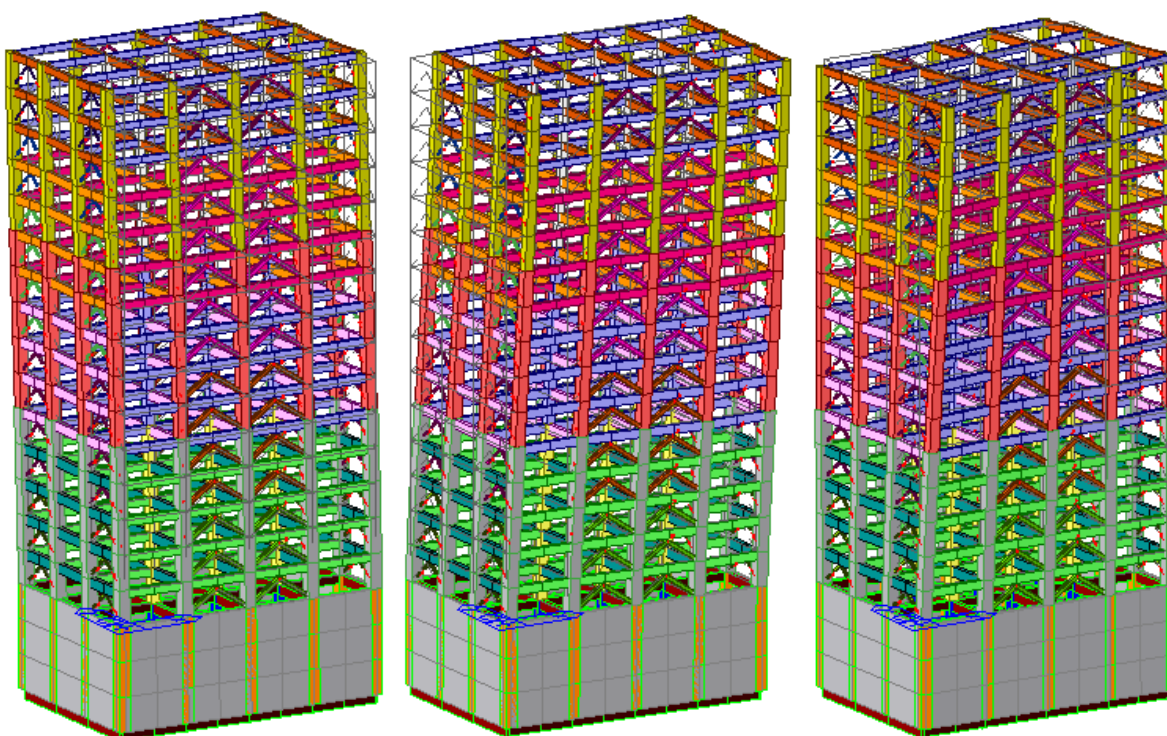


a) Modo de Traslación NS

b) Modo de Traslación EW

c) Modo de Rotación

Figura 6.24. Modos de vibrar para modelo de ocho entrepisos con base flexible

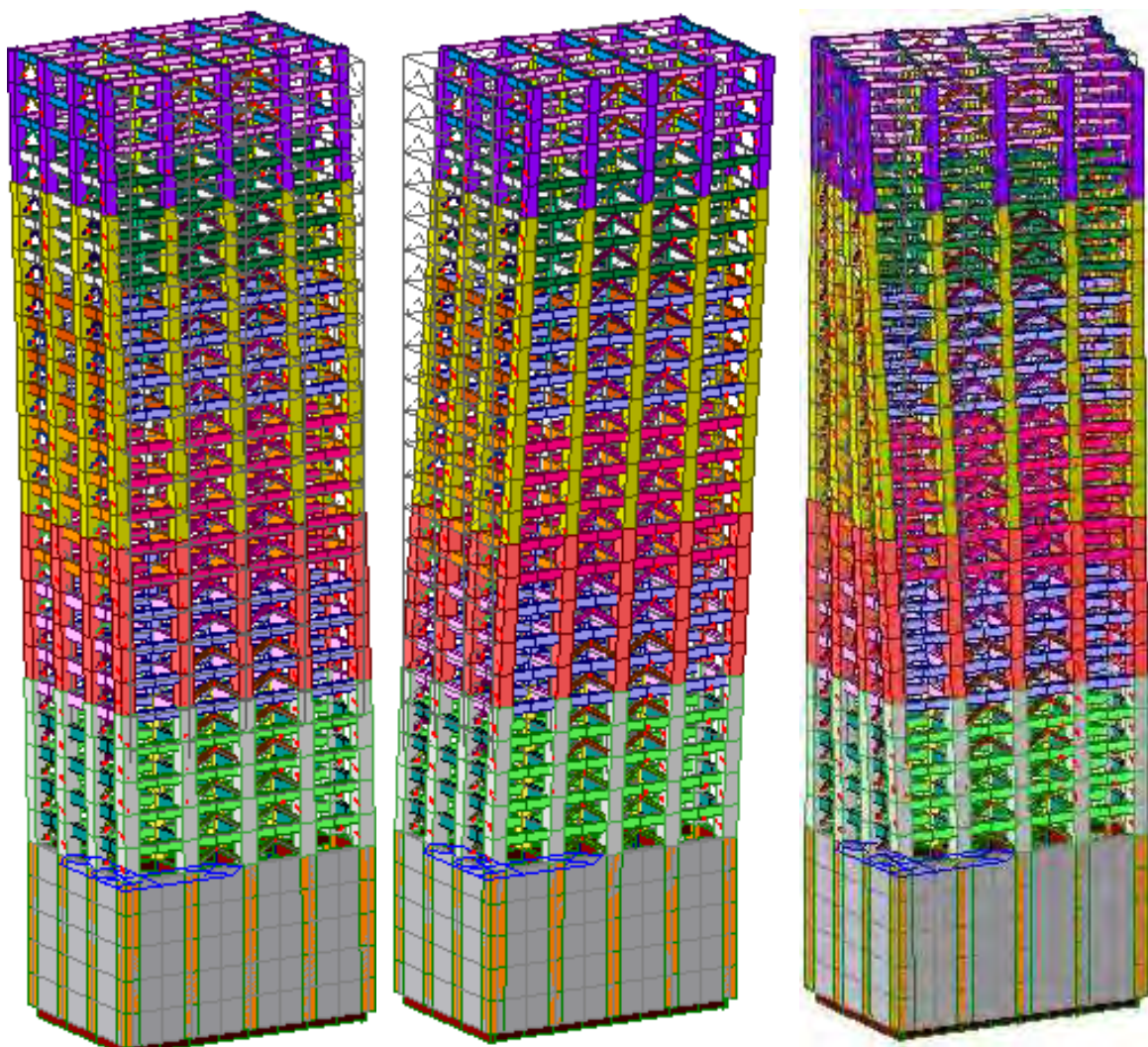


a) Modo de Traslación NS

b) Modo de Traslación EW

c) Modo de Rotación

Figura 6.25. Modos de vibrar para modelo de 15 entrepisos con base flexible



a) Modo de Traslación NS

b) Modo de Traslación EW

c) Modo de Rotación

Figura 6.26. Modos de vibrar para modelo de 24 entresijos con base flexible

6.6.3 Diseño final para los disipadores de energía en dirección X

Aprovechando la configuración estructural para los disipadores de energía que se aplicarán en la dirección x , se realizó una comparativa de diseño, con el objetivo de evaluar el uso de distintos tipos de estos dispositivos que hayan sido reportados y ampliamente estudiados, tanto de manera experimental como analítica. De esta manera, se decidió comparar disipadores del tipo ADAS, TADAS y panel de cortante. Se calcularon, además del número de placas a utilizar (ADAS o TADAS), sus distintas propiedades mecánicas y geométricas. Para el caso de disipadores tipo panel de cortante, se adecuaron los valores geométricos a perfiles de acero comerciales del tipo “I”. Además, se variaron las características de los disipadores en los mismos entresijos donde se varió el cambio de los contravientos, para asegurar el balance de rigidez entre contraviento y disipador (β).

En las tablas 6.15 a 6.17 se presentan las propiedades geométricas de los disipadores en la dirección x , para los modelos tridimensionales evaluados a lo largo de esta sección. Se aprecia de estas tablas que existen cambios de secciones conforme aumenta la elevación, y estos cambios coinciden con los cambios de sección en los contravientos para mantener la relación de rigidez β acorde a la propuesta inicial de diseño ($\beta=0.50$). Además, para cada tipo de disipador calculado, se emplearon las propiedades geométricas más representativas y éstas se pueden asociar a los términos utilizados para el cálculo de rigidez del dispositivo en cuestión con las figuras 6.4 a 6.6.

Para los disipadores tipo ADAS y TADAS, se tienen propiedades referentes a la altura del disipador y cantidad de placas necesarias para cumplir con los requisitos de rigidez y de resistencia necesarias. Se observa que no existen diferencias significativas en la altura del dispositivo; sin embargo, conforme el número de entrepisos aumenta, el espesor y número de placas utilizadas tienden a ser menor para los dispositivos ADAS; en otras palabras, para los modelos de ocho y 15 entrepisos se necesita menor número de placas o menor espesor para los dispositivos ADAS en comparación que los dispositivos TADAS, para los mismos requisitos de rigidez y de resistencia. En el caso de los disipadores tipo panel de cortante, se aprecia que la altura que se necesitaría para cumplir con los requisitos de diseño, es de hasta tres veces mayor en comparación con los dispositivos tipos ADAS o TADAS, para los últimos entrepisos; esto se debe a que se seleccionaron perfiles comerciales y el espesor del alma de éstos es mucho menor con respecto a los que se usaron para los disipadores ADAS o TADAS. Además, la resistencia de diseño no depende de la altura del panel de cortante de manera directa, sino de la longitud y del espesor del alma (figura 6.6), y esto afectará directamente en el ángulo del contraviento usado tanto de manera teórica para el análisis como para el montado en construcción del mismo.

Tabla 6.15. Propiedades geométricas de los disipadores del modelo de 8 niveles

Disipador	ADAS				TADAS					Panel de Cortante				
	h (cm)	t (in)	Placas	β	h (cm)	b (cm)	t (in)	Placas	β	h (cm)	w (in)	t (in)	Perfil	β
D1x 1-2	25	1.375	7	0.47	20	35	1.375	7	0.51	60	14.20	0.45	W14x74	0.48
D2x 3-5	25	1.375	6	0.49	20	30	1.375	7	0.50	60	14.00	0.415	W14x68	0.54
D3x 6-7	20	1.375	4	0.51	20	25	1.375	5	0.48	55	9.92	0.315	W10x39	0.52
D4x 8	15	0.625	3	0.46	15	20	0.625	4	0.47	50	7.89	0.17	W8x10	0.49

Tabla 6.16. Propiedades geométricas de los disipadores del modelo de 15 niveles

Disipador	ADAS				TADAS					Panel de Cortante				
	h (cm)	t (in)	Placas	β	h (cm)	b (cm)	t (in)	Placas	β	h (cm)	w (in)	t (in)	Perfil	β
D1x 1-3	30	2	10	0.48	20	45	2	10	0.53	55	22.7	0.83	W21x182	0.53
D2x 4-7	25	2	9	0.52	20	45	2	9	0.47	55	22.5	0.75	W21x166	0.50
D3x 8-11	25	1.75	8	0.50	20	35	2	8	0.51	55	19.0	0.655	W18x119	0.52
D4x 12-13	25	1.625	5	0.50	20	35	2	6	0.51	40	16.3	0.395	W16x67	0.53
D5x 14-15	15	1.25	4	0.51	20	25	2	4	0.48	35	9.9	0.315	W10x39	0.54

Tabla 6.17. Propiedades geométricas de los disipadores del modelo de 24 niveles

Disipador	ADAS				TADAS					Panel de Cortante				
	h (cm)	t (in)	Placas	β	h (cm)	b (cm)	t (in)	Placas	β	h (cm)	w (in)	t (in)	Perfil	β
D01x 1-3	30	2	13	0.48	25	60	2	10	0.51	65	36.3	0.725	W36x182	0.49
D02x 4-7	30	2	13	0.51	25	60	2	10	0.51	65	36.3	0.725	W36x182	0.49
D03x 8-11	30	2	12	0.53	25	50	2	11	0.53	60	33.7	0.715	W33x201	0.50
D04x 12-16	30	2	9	0.50	25	40	2	10	0.49	60	30.2	0.585	W30x124	0.51
D05x 17-20	30	1.75	8	0.48	25	40	2	9	0.50	50	24.1	0.5	W24x104	0.51
D06x 21-22	25	1.375	7	0.50	25	30	2	9	0.52	50	16.3	0.395	W16x67	0.47
D07x 23-24	15	1	7	0.49	20	30	1	9	0.51	50	11.9	0.295	W12x40	0.48

6.6.4 Diseño final para los disipadores de energía en dirección Y

Para la dirección y se decidió usar contravientos restringidos contra pandeo (BRB, por sus siglas en inglés). En las tablas 6.18 a 6.20 se muestran las propiedades geométricas de los BRBs utilizados para los diferentes modelos tridimensionales evaluados. La sección transversal de éstos se varió en formas cruciformes o rectangulares, acorde a los requerimientos de resistencia necesarios. La longitud referida en las tablas antes mencionadas, es la longitud del segmento del corazón metálico (figura 6.8). La longitudes medias del segmento de conexión y de transición se modelaron con un único elemento, que solo admite carga axial; la rigidez elástica del BRB es igual a la rigidez elástica que proporciona la longitud del segmento de conexión y de transición completa, es decir, la suma de ambas mitades de los extremos. De manera práctica se cuidó que la rigidez calculada con las propiedades geométricas del dispositivo BRB fuera lo más cercana a la rigidez del elemento de soporte. Por tal motivo, el parámetro β no es exactamente 1.00, pero no presenta una variación mayor al 4% para ningún caso, por lo que para efectos prácticos este valor se toma como válido. Se aprecia de las tablas 6.18 a 6.20 que se tipificaron las secciones de los BRBs en los mismos entrepisos que en la dirección x. El tamaño de la sección del corazón metálico y la longitud de dicho segmento disminuía conforme aumentaba la altura de entrepiso para el mismo modelo, por esto, se aprecia que para los últimos entrepisos la sección transversal del corazón metálico cambia de una sección cruciforme a una sección rectangular formada por una sola placa.

Tabla 6.18. Propiedades geométricas de los BRBs del modelo de 8 niveles

Disipador	L (cm)	t (in)	h (in)	Sección	Área (cm ²)	β
BRBy 1-2	135	1.000	2.750	+	29.03	0.999
BRBy 3-5	110	1.000	2.625	+	27.42	0.965
BRBy 6-7	115	0.625	4.000	-	16.13	0.979
BRBy 8	150	0.250	3.250	-	5.24	0.964

Tabla 6.19. Propiedades geométricas de los BRBs del modelo de 15 niveles

Disipador	L (cm)	t (in)	h (in)	Sección	Área (cm ²)	β
BRBy 1-3	125	1.250	6.000	+	86.69	0.975
BRBy 4-7	120	1.125	5.500	+	71.67	0.968
BRBy 8-11	105	1.000	4.125	+	46.77	0.993
BRBy 12-13	85	0.750	4.500	-	21.77	0.995
BRBy 14-15	80	0.625	2.750	-	11.09	0.995

Tabla 6.20. Propiedades geométricas de los BRBs del modelo de 24 niveles

Disipador	L (cm)	t (in)	h (in)	Sección	Área (cm ²)	β
BRBy 1-3	135	1.500	5.625	+	94.35	0.966
BRBy 4-7	125	1.500	5.625	+	94.35	0.981
BRBy 8-11	125	1.250	4.625	+	64.52	0.968
BRBy 12-16	125	1.000	4.500	+	51.61	0.976
BRBy 17-20	120	0.625	4.375	+	32.76	0.971
BRBy 21-22	100	0.625	4.375	-	17.64	0.993
BRBy 23-24	85	0.250	4.750	-	7.66	1.000

6.6.5 Diseño final de contravientos

Los contravientos metálicos se diseñaron para que permanecieran elásticos durante todo el evento sísmico y por lo tanto no se presentara una desconexión del disipador antes que éste alcanzara su ductilidad máxima. Se usó un acero tipo A-36 con $f_y=2530 \text{ kg/cm}^2$ y con sección transversal tubular cuadrada para todos los contravientos. La razón principal se debe a que la condición de rigidez rigió el diseño de estos elementos y no el de resistencia en la mayoría de los casos. En otras palabras, se modeló y diseñó a este elemento para que trabajara exclusivamente ante carga axial, por lo que su rigidez elástica no estaría definida por la resistencia a fluencia del material, sino por su módulo de elasticidad, el área de la sección transversal, la longitud del elemento y su ángulo de contraventeo (configuración Chevrón). Para el diseño se siguieron las especificaciones de las NTCM-04 y se aseguró que todos los elementos fueran sección tipo 1 (sección 2.3) y que su relación de esbeltez no excediera el valor de $5.88 \sqrt{E/f_y}$ (sección 6.2.3.2). Además, se revisó que la resistencia de diseño del elemento no excediera los límites de inestabilidad por flexión acorde a la sección 3.2.2.1 (NTCM-04) y a su vez se utilizó un factor de seguridad adicional de 1.5 siguiendo las recomendaciones del Ingeniero Martínez Romero (Tena 2011).

En las tablas 6.21 a 6.23, se resumen las secciones transversales para los contravientos utilizados en la dirección x de todos los modelos evaluados. Como se mencionó en el párrafo anterior, las secciones son de tipo tubular cuadrado, por lo que el valor de b y h son los mismos y los espesores en ningún caso exceden de 2". Se aprecia de estas tablas que conforme más grande se hace el modelo en altura, menor es la relación demanda entre capacidad de los elementos; esto es consecuencia de la selección del balance de rigidez α , es decir, a mayor número de entrepisos mayor debe ser el valor de α , en consecuencia la resistencia que toma el contraviento es menor.

Tabla 6.21. Propiedades geométricas de contravientos en la dirección x , modelo 8 niveles

Entrepiso	b (in)	h (in)	t (in)	Demanda / Capacidad
CV1x 1-2	11	11	1 5/8	14.02%
CV2x 3-5	10	10	1 5/8	18.36%
CV3x 6-7	8	8	1 1/8	99.11%
CV4x 8	6	6	1/4	95.24%

Tabla 6.22. Propiedades geométricas de contravientos en la dirección x , modelo 15 niveles

Entrepiso	b (in)	h (in)	t (in)	Demanda / Capacidad
CV1x 1-3	19	19	2	19.10%
CV2x 4-7	18	18	1 3/4	21.51%
CV3x 8-11	17	17	1 1/2	26.79%
CV4x 12-13	14	14	1 1/4	24.15%
CV5x 14-15	11	11	1	23.32%

Tabla 6.23. Propiedades geométricas de contravientos en la dirección x , modelo 24 niveles

Entrepiso	b (in)	h (in)	t (in)	Demanda / Capacidad
CV1x 1-3	19	19	2	31.45%
CV2x 4-7	18	18	2	32.58%
CV3x 8-11	18	18	2	29.77%
CV4x 12-16	16	16	1 3/4	31.47%
CV5x 17-20	13	13	1 1/2	30.35%
CV6x 21-22	10	10	1 1/4	25.36%
CV7x 23-24	9	9	1 1/8	16.03%

En la dirección y se mantuvo la configuración de contraventeo chevrón pero con el uso de dispositivos BRBs, la forma de modelar a éstos se hizo a partir de tres secciones donde la parte media es la única que debe actuar de manera no lineal (figura 6.8). Las secciones de los extremos se modelaron con elementos que trabajan exclusivamente a carga axial, pero se seleccionó una sección equivalente que tuviera la misma rigidez axial elástica del BRB con el objetivo de monitorear si estos extremos permanecían elásticos o no en los análisis no lineales. En las tablas 6.24 a 6.26 se resumen las secciones equivalentes usados en el modelo analítico para cada edificio estudiado.

Tabla 6.24. Propiedades geométricas de contravientos en la dirección y, modelo 8 niveles

Entrepiso	b (in)	h (in)	t (in)	Demanda / Capacidad
CV1y 1-2	8	8	3/8	70.20%
CV2y 3-5	8	8	1/2	51.35%
CV3y 6-7	6	6	3/8	62.26%
CV4y 8	4	4	1/8	88.90%

Tabla 6.25. Propiedades geométricas de contravientos en la dirección y, modelo 15 niveles

Entrepiso	b (in)	h (in)	t (in)	Demanda / Capacidad
CV1y 1-3	10	10	1	63.92%
CV2y 4-7	9	9	1	65.60%
CV3y 8-11	9	9	3/4	67.43%
CV4y 12-13	8	8	1/2	63.26%
CV5y 14-15	6	6	3/8	65.15%

Tabla 6.26. Propiedades geométricas de contravientos en la dirección y, modelo 24 niveles

Entrepiso	b (in)	h (in)	t (in)	Demanda / Capacidad
CV1y 1-3	14	14	5/8	81.20%
CV2y 4-7	13	13	3/4	72.31%
CV3y 8-11	11	11	5/8	95.01%
CV4y 12-16	11	11	1/2	98.53%
CV5y 17-20	10	10	3/8	96.09%
CV6y 21-22	7	7	3/8	79.29%
CV7y 23-24	5.5	5.5	1/4	96.73%

6.6.6 Secciones finales para vigas y columnas de los modelos tridimensionales

Como se mencionó en párrafos anteriores, para el proceso de diseño para vigas y columnas se siguieron los requisitos de resistencia establecidas en las Normas Técnicas Complementarias para estructuras de Concreto (NTCC-04). En primera instancia, se realizó un pre-diseño con un modelo analítico donde intervenían solo vigas y columnas con un porcentaje del cortante basal de diseño proporcional al balance de rigidez establecido que le corresponde al sistema del marco (α). Para las columnas de los modelos que tuvieran una relación de esbeltez mayor a 2.5 se consideró una combinación especial de carga para asegurar que las columnas conectadas al sistema contraviento-disipador permanezcan elásticas durante todo el evento sísmico (sección 6.5).

Para todos los elementos de concreto diseñados en el presente trabajo, se utilizó un concreto clase I que se fabricará con agregados gruesos con peso específico superior a 2.6, como calizas o basaltos (sección 1.5.1.1 NTCC-04); pero como se consideró que el módulo de elasticidad es $14,000\sqrt{f'_c}$, el agregado grueso debe ser calizo (sección 1.5.1.4 NTCC-04). Es importante mencionar la relevancia que tiene el tipo del agregado cuando se calcula el módulo de elasticidad del concreto, dado que en las NTCC-04 se hacen diferencias para el cálculo de este parámetro según su peso y su naturaleza (caliza, basalto o andesita), y aun así se esperan dispersiones cuando se compara con los resultados obtenidos de pruebas experimentales (figura 6.27). Por este motivo, se debe tener en mente el nivel de incertidumbre en el cálculo de los periodos de vibrar de la estructura y de las distorsiones de entrepiso de los modelos analíticos (Tena 2018).

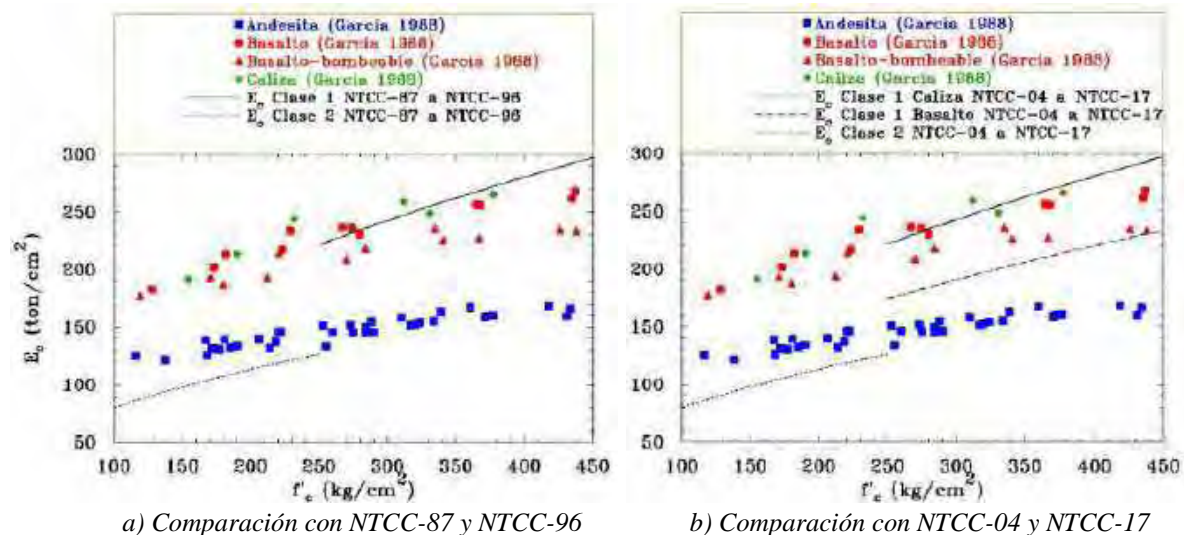


Figura 6.27. Variación del módulo de elasticidad del concreto (E_c) con la resistencia índice a la compresión del concreto (f'_c) de las pruebas realizadas a los 28 días y reportadas por García en 1988 y su comparación con las Normas de Concreto del Reglamento de la Ciudad de México entre 1987 y 2017 (Tena 2018)

Se aseguró que los cambios de sección de vigas y columnas no se presentarán de manera simultánea en ningún entrepiso, y éstos a su vez tampoco coincidieran con los cambios de sección del sistema contraviento-disipador. Se distinguen dos tipos de configuraciones para vigas y columnas. Se hicieron diferencias en las secciones transversales de las vigas conforme a la dirección de análisis, dado que la longitud entre claros son diferentes para ambas direcciones (figura 6.1). Para el caso de las columnas, se discretizaron de manera diferente aquéllas que tienen interconexión con el sistema contraviento-disipador (columnas exteriores), con aquéllas que no la tienen (columnas interiores). Para todos los casos, se diseñó la dirección y más rígida que la dirección ortogonal a ésta, dado que la configuración estructural propuesta es más esbelta en dicha dirección y, por experiencia, de los marcos planos estudiados en el capítulo cuatro, el aporte de rigidez del sistema del marco debe ser mayor conforme la altura del edificio aumenta también, con el objetivo de asegurar un diseño resiliente.

En las tablas 6.27 a 6.29 se presenta el resumen de las secciones y armados para los elementos de los marcos a momento de todos los modelos evaluados. Se observa de la tabla 6.27 que la diferencia en secciones transversales y en armados para las vigas es mínima en ambas direcciones de análisis; lo mismo sucede con las columnas exteriores e interiores, donde el porcentaje de cuantías es similar entre ambas condiciones de las secciones. Conforme la altura de los modelos aumenta, las diferencias entre las direcciones de análisis se hacen más perceptible.

Por ejemplo, para el modelo con 15 entrepisos, las secciones transversales en la dirección y es hasta un 40% mayor con respecto al mismo entrepiso, y estas diferencias van disminuyendo conforme la altura del modelo va en aumento, dado que los requisitos de resistencia tienden a ser menores también (tabla 6.28). Para el caso de las columnas en el modelo de 15 niveles, se usó la combinación de carga especial para el diseño de las columnas exteriores debido a que presentaba un valor de $H/L=2.86$ (sección 6.5); el uso de ésta repercutió que el área de la sección a utilizar fuera mayor hasta en un 40% también, en comparación con el de las columnas interiores.

Finalmente, para los elementos de concreto del modelo más esbelto en estudio, el porcentaje de aumento en secciones transversales para vigas se mantuvo en un máximo del 40%, que se presentó para las secciones de los entrepisos 5 a 8 de la dirección y. En el caso de las columnas, el aumento en sección transversal entre exteriores e interiores presentó una diferencia del 240% (tabla 6.10). Se observa de las tablas 6.27 a 6.29 que la cuantía máxima usada para las columnas no rebasó el valor del 4% como se estipula en la NTCC-04 (sección 7.3.3.a). Se aprecia también que conforme el modelo aumenta en altura, la cuantía que se usó en las secciones para las columnas exteriores disminuye, debido al aumento de la sección transversal y a la separación mínima permisible entre las barras longitudinales de refuerzo estipulado en la NTCC-04 (sección 5.9). Por tal motivo, se observa de la tabla 6.29 que la cuantía máxima para las columnas exteriores es del 2.28%, mientras que para las columnas interiores es del 3.8% (para secciones transversales menores).

En otras palabras, para asegurar un diseño resiliente en edificios de concreto reforzado con disipadores de energía para edificios esbeltos ($H/L > 2.5$), se aumentó la sección para acomodar la cantidad de barras de refuerzo necesarias para satisfacer los requisitos de resistencia impuestas por la combinación especial de carga detallada en la sección 6.5 del presente documento.

Tabla 6.27. Modelo de 8 niveles, $\alpha_x=0.25$, $\beta_x=0.50$, $\alpha_y=0.35$, $\beta_y=1.00$, $f'_c=250\text{kg/cm}^2$ (unidades: cm)

	Entrepiso	b	h	Lecho Superior	Lecho Inferior	Est. Extremo	Est. Centro
Vigas	V1x 1-4	40	70	6 Vs No.8	5 Vs No. 8	4 No. 2.5 @ 15	4 No. 2.5 @ 25
	V2x 5-7	35	65	6 Vs No.8	4 Vs No. 8	4 No. 2.5 @ 15	4 No. 2.5 @ 25
	V3x 8	30	50	4 Vs No.8	3 Vs No.8	2 No. 2.5 @ 10	2 No. 2.5 @ 20
	V1y 1-4	40	75	6 Vs No.8	6 Vs No.8	4 No. 2.5 @ 15	4 No. 2.5 @ 25
	V2y 5-7	35	65	5 Vs No.8	5 Vs No.6	3 No. 2.5 @ 15	3 No. 2.5 @ 20
	V3y 8	25	50	4 Vs No.6	2Vs No.5	2 No. 2.5 @ 10	2 No. 2.5 @ 15
Columnas	Entrepiso	b	h	Refuerzo Long.	Cuantía	Est. Extremo	Est. Centro
	C1 Ext 1-3	65	65	32 Vs No. 8	3.84%	5 No. 3 @ 10	5 No. 3 @ 20
	C2 Ext 4-6	55	55	24 Vs No. 8	3.99%	4 No. 3 @ 10	4 No. 3 @ 20
	C3 Ext 7-8	50	50	16 Vs No. 8	3.24%	4 No. 3 @ 10	4 No. 3 @ 15
	C1 Int 1-3	65	65	32 Vs No. 8	3.84%	5 No. 3 @ 10	5 No. 3 @ 20
	C2 Int 4-6	55	55	20 Vs No. 8	3.35%	4 No. 3 @ 10	4 No. 3 @ 20
	C3 Int 7-8	50	50	24 Vs No. 6	3.19%	4 No. 3 @ 10	4 No. 3 @ 20

Tabla 6.28. Modelo de 15 niveles, $\alpha_x=0.35$, $\beta_x=0.50$, $\alpha_y=0.50$, $\beta_y=1.00$, $f'_c=250\text{kg/cm}^2$ (unidades: cm)

	Entrepiso	b	h	Lecho Superior	Lecho Inferior	Est. Extremo	Est. Centro
Vigas	V1x 1-4	50	100	7 Vs No.10 + 2 Vs No.8	7 Vs No.10 + 2 Vs No.8	4 No. 3 @ 10	4 No. 3 @ 20
	V2x 5-8	50	100	7 Vs No.10 + 2 Vs No.8	7 Vs No.10 + 2 Vs No.8	4 No. 3 @ 10	4 No. 3 @ 20
	V3x 9-12	45	90	7 Vs No.10	6 Vs No.10	4 No. 3 @ 15	4 No. 3 @ 20
	V4x 13-15	35	75	4 Vs No.10	4 Vs No.8	2 No. 3 @ 15	2 No. 3 @ 25
	V1y 1-4	60	115	8 Vs No.12 + 2Vs No.10	8 Vs No.12	6 No. 4 @ 20	6 No. 4 @ 25
	V2y 5-8	55	110	7 Vs No.12 + 2Vs No.10	7 Vs No.12	4 No. 4 @ 15	4 No. 4 @ 20
	V3y 9-12	55	100	7 Vs No.12	6 Vs No.12	4 No. 4 @ 20	4 No. 4 @ 25
	V4y 13-15	45	85	6 Vs No.10	5 Vs No.10	4 No. 3 @ 20	4 No. 3 @ 30
Columnas	Entrepiso	b	h	Refuerzo Long.	Cuantía	Est. Extremo	Est. Centro
	C1 Ext 1-5	135	135	52 Vs No. 12	3.25%	8 No. 4 @ 10	8 No. 4 @ 20
	C2 Ext 6-10	120	120	40 Vs No. 10	2.20%	6 No. 4 @ 10	6 No. 4 @ 20
	C3 Ext 11-15	105	105	24 Vs No. 10	1.72%	5 No. 4 @ 10	5 No. 4 @ 20
	C1 Int 1-5	115	115	48 Vs No. 10	3.14%	8 No. 3 @ 10	8 No. 3 @ 20
	C2 Int 6-10	110	110	40 Vs No. 10	3.17%	6 No. 4 @ 10	6 No. 4 @ 20
	C3 Int 11-15	100	100	28 Vs No. 10	3.07%	6 No. 3 @ 10	6 No. 3 @ 20

Tabla 6.29. Modelo de 24 niveles, $\alpha_x=0.50$, $\beta_x=0.50$, $\alpha_y=0.65$, $\beta_y=1.00$, $f'_c=300\text{kg/cm}^2$ (unidades: cm)

Vigas	Entrepiso	b	h	Lecho Superior	Lecho Inferior	Est. Extremo	Est. Centro
	V1x 1-4	65	120	9 Vs No.12 + 2Vs No.12	9 Vs No.12 + 2 Vs No.12	5 No. 4 @ 10	5 No. 4 @ 20
	V2x 5-8	60	120	8 Vs No.12 + 2Vs No.12	8 Vs No.12 + 2 Vs No.12	6 No. 4 @ 10	6 No. 4 @ 20
	V3x 9-13	60	120	8 Vs No.12 + 2Vs No.12	8 Vs No.12 + 2 Vs No.12	6 No. 4 @ 15	6 No. 4 @ 25
	V4x 14-17	50	110	6 Vs No.12 + 2Vs No.12	5 Vs No.12 + 2 Vs No.12	4 No. 4 @ 15	4 No. 4 @ 25
	V5x 18-21	50	90	6 Vs No.12	5 Vs No.12	4 No. 3 @ 15	4 No. 3 @ 25
	V6x 22-24	35	80	5 Vs No.10	3 Vs No.10	3 No. 3 @ 20	3 No. 3 @ 30
	V1y 1-4	65	145	9 Vs No.12 + 2Vs No.12	9 Vs No.12 + 2Vs No.12	5 No. 4 @ 10	5 No. 4 @ 15
	V2y 5-8	75	145	12Vs No.12 + 2Vs No.12	11Vs No.12 + 2Vs No.12	8 No. 4 @ 15	8 No. 4 @ 20
	V3y 9-13	65	135	10Vs No.12 + 2Vs No.12	10Vs No.12 + 2Vs No.12	6 No. 4 @ 15	6 No. 4 @ 20
Columnas	Entrepiso	b	h	Refuerzo Long.	Cuantía	Est. Extremo	Est. Centro
	C1 Ext 1-5	200	200	80 Vs No. 12	2.28%	10 No. 4 @ 10	10 No. 4 @ 15
	C2 Ext 6-10	185	185	56 Vs No. 12	1.87%	9 No. 4 @ 10	9 No. 4 @ 15
	C3 Ext 11-15	170	170	40 Vs No. 12	1.58%	8 No. 4 @ 10	8 No. 4 @ 15
	C4 Ext 16-20	155	155	32 Vs No. 12	1.52%	8 No. 4 @ 10	8 No. 4 @ 20
	C5 Ext 21-24	140	140	32 Vs No. 10	1.29%	7 No. 4 @ 10	7 No. 4 @ 20
	C1 Int 1-5	130	130	48 Vs No. 12	3.24%	8 No. 4 @ 10	8 No. 4 @ 15
	C2 Int 6-10	120	120	48 Vs No. 12	3.80%	8 No. 4 @ 10	8 No. 4 @ 15
	C3 Int 11-15	110	110	40 Vs No. 12	3.77%	6 No. 4 @ 10	6 No. 4 @ 15
	C4 Int 16-20	105	105	44 Vs No. 10	3.16%	8 No. 4 @ 10	8 No. 4 @ 20
	C5 Int 21-24	90	90	28 Vs No. 10	2.74%	6 No. 4 @ 10	6 No. 4 @ 20

En las tablas 6.30 a 6.33 se resumen las secciones transversales de los elementos de concreto reforzado del sótano. Se utilizó la misma resistencia a compresión del concreto de los elementos de la superestructura; es decir, para los modelos de ocho y 15 niveles se usó un $f'_c=250\text{ kg/cm}^2$, para el modelo de 24 niveles se utilizó un $f'_c = 300\text{ kg/cm}^2$. Al igual que los elementos de concreto por encima del nivel cero del terreno, se hicieron diferencias en las vigas en dirección x y y ; las columnas también se discretizaron acorde a si estaban conectadas al sistema contraviento-disipador o no (columnas exteriores e interiores). Sin embargo, se respetaron las secciones transversales de planta baja y se variaron los armados acorde a los requisitos de resistencia. Además, se diseñaron y modelaron los muros de concreto reforzado en el perímetro de la zona del cajón de cimentación, los cuáles fueron aumentando de espesor acorde aumentaba la altura de los modelos en conjunto con el número de cajones de cimentación (Apéndice C). Finalmente, se consideraron grupos de nueve pilotes por debajo de cada columna; para el modelo de ocho niveles, se usaron pilotes de fricción de 10 m de longitud (tabla 6.30), con las mismas características geométricas y mecánicas independientemente si descargaban columnas de la periferia o interiores en éstos. Para los modelos de 15 y 24 niveles, se usaron pilotes de punta que descargaban hasta el estrato firme haciendo diferencias entre qué tipo de columna descargaba en dicha cimentación (tabla 6.31 y 6.32).

Tabla 6.30. Elementos del sótano del modelo de 8 niveles, $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$ (unidades: cm)

Vigas	Sótano	b	h	Lecho Superior	Lecho Inferior	Est. Extremo	Est. Centro
	VSx	40	70	5 Vs No.8	5 Vs No. 6	3 No. 3 @ 10	3 No. 3 @ 20
	VSy	40	70	4 Vs No.8	3 Vs No. 6	4 No. 3 @ 10	4 No. 3 @ 20
Columna	Sótano	b	h	Refuerzo Long.	Cuantía	Est. Extremo	Est. Centro
	CS Ext	65	65	24 Vs No. 8	2.88%	5 No. 3 @ 10	5 No. 3 @ 20
	CS Int	65	65	28 Vs No. 8	3.36%	6 No. 3 @ 10	6 No. 3 @ 20
Muro	Sótano	t	Refuerzo a flexión		Refuerzo a Cortante		
	Mx	12	2 Vs No.4 @ 30		Vs No.3 @ 35		
	My	12	2 Vs No.4 @ 30		Vs No.3 @ 35		
Pilotes	Sótano	d	Pilotes por columna		Longitud (m)	H _s (m)	
	Fricción	60	9		10	28	

Tabla 6.31. Elementos del sótano del modelo de 15 niveles, $f'_c=250 \text{ kg/cm}^2$ (unidades: cm)

Vigas	Sótano	b	h	Lecho Superior	Lecho Inferior	Est. Extremo	Est. Centro
	VSx	50	100	6 Vs No.8	5 Vs No.6	3 No. 3 @ 15	3 No. 3 @ 25
	VSy	60	115	8 Vs No.8	6 Vs No.8	6 No. 3 @ 15	6 No. 3 @ 25
Columna	Sótano	b	h	Refuerzo Long.	Cuantía	Est. Extremo	Est. Centro
	CS Ext	135	135	44 Vs No. 12	2.75%	8 No. 4 @ 10	7 No. 4 @ 20
	CS Int	115	115	44 Vs No. 8	1.69%	8 No. 3 @ 10	8 No. 3 @ 20
Muro	Sótano	t	Refuerzo a flexión		Refuerzo a Cortante		
	Mx	30	2 Vs No.5 @ 40		Vs No.4 @ 35		
	My	40	2 Vs No.5 @ 30		Vs No.4 @ 25		
Pilotes	Sótano	d	Pilotes por columna		Longitud (m)	H _s (m)	
	Punta Ext	40	9		37.4	51	
	Punta Int	35	9		37.9	51	

Tabla 6.32. Elementos del sótano del modelo de 24 niveles, $f'_c=300 \text{ kg/cm}^2$ (unidades: cm)

Vigas	Sótano	b	h	Lecho Superior	Lecho Inferior	Est. Extremo	Est. Centro
	VSx	65	120	9 Vs No.8	6 Vs No.8	5 No. 4 @ 15	5 No. 4 @ 25
	VSy	65	145	8 Vs No.10	6 Vs No.10	6 No. 4 @ 20	6 No. 4 @ 30
Columna	Sótano	b	h	Refuerzo Long.	Cuantía	Est. Extremo	Est. Centro
	CS Ext	200	200	72 Vs No. 12	2.05%	10 No. 4 @ 10	10 No. 4 @ 15
	CS Int	130	130	28 Vs No. 10	1.31 %	7 No. 4 @ 10	7 No. 4 @ 20
Muro	Sótano	t	Refuerzo a flexión		Refuerzo a Cortante		
	Mx	55	2 Vs No.6 @ 40		Vs No.5 @ 25		
	My	65	2 Vs No.6 @ 30		Vs No.5 @ 20		
Pilotes	Sótano	d	Pilotes por columna		Longitud (m)	H _s (m)	
	Punta Ext	50	9		38.5	61	
	Punta Int	35	9		39.5	61	

6.6.7 Impacto en el diseño de columnas de los edificios esbeltos

En la figura 6.28 se presentan los diagramas de interacción de la columna de esquina empleada para los primeros cinco niveles para el modelo tridimensional de 24 entrepisos. Esta columna es cuadrada y con refuerzo longitudinal simétrico para cada dirección de análisis, por ello, los diagramas de interacción son iguales (figuras 6.28a y 6.28b). Se aprecia con color azul, el diagrama de interacción y los valores de diseño obtenidos del análisis; en color rojo, el diagrama de interacción y los valores de diseño obtenidos con la nueva combinación de carga propuesta (figura 6.18). Se observa de la figura 6.28 que el diagrama de interacción en rojo logra cubrir las demandas a flexocompresión y a flexotensión para las secciones y armados obtenidos del diseño con la nueva combinación de carga. Se prevé que con la nueva propuesta para el diseño de columnas con el sistema contraviento-disipador, para los modelos con $H/L > 2.5$, éstas permanezcan elásticas, incluso para relaciones de rigidez donde el sistema del marco aporte menor rigidez al sistema global ($\alpha=0.25$).

Evaluando el comportamiento no lineal que desarrollan las columnas sin la nueva combinación de carga, se aprecia que es mucho mayor en la dirección “y”, que a su vez está asociado a magnitudes mayores de fluencias inelásticas, comparado con el comportamiento no lineal en la dirección “x”. Para la mayoría de los casos, dicho comportamiento no lineal estarían cubiertos con la nueva combinación de diseño propuesta (envolventes en rojo). Para la dirección con mayor relación de esbeltez se observa que el comportamiento no lineal de la columna del primer entepiso no logra quedar dentro de la nueva propuesta de diseño (figura 6.28b); sin embargo, cabe mencionar que con el aumento de su sección transversal y de su armado de refuerzo, se incrementa también el momento de fluencia de dicha sección, por lo que se espera que esta nueva combinación de carga sea más que suficiente para asegurar que las columnas se comporten de manera elástica durante todo el evento sísmico.

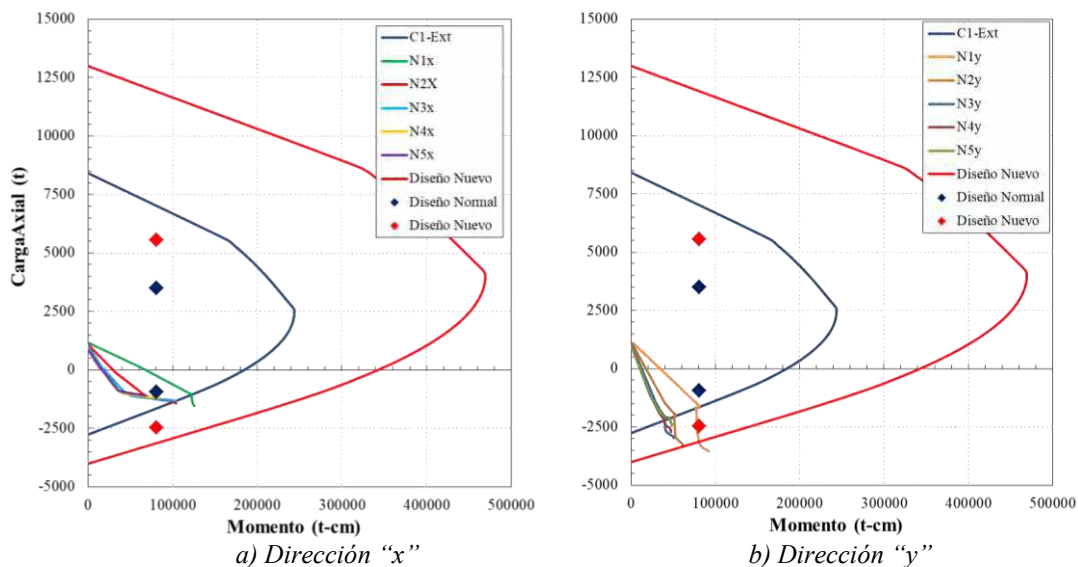


Figura 6.28. Diagramas de interacción de columna “C1-ext”, modelo tridimensional de 24 Niveles

6.7 Revisión de los balances de rigidez α y β de diseño

En las tablas 6.15 a 6.20 se proporcionan los valores de β asociados a los diseños de los distintos disipadores considerados, donde se comprueba que la diferencia máxima con respecto al balance originalmente propuesto en los disipadores en la dirección x es sólo del 8% para los dispositivos ADAS, 6% para los dispositivos TADAS y 8% para los dispositivos Pánel de Cortante. En la dirección y , la máxima diferencia es del 3.6% para los BRBs.

En las tablas 6.33 a 6.35 se presentan las rigideces laterales de cada uno de los modelos tridimensionales evaluados en base rígida. Se distinguen de éstas dos columnas referentes a la rigidez lateral del marco en las direcciones x y y , tres columnas referentes a la rigidez del sistema contraviento-disipador en la dirección x , con los tres sistemas de disipación de energía estudiados en el presente trabajo (ADAS, TADAS y panel de cortante). Asimismo, se aprecia para cada entrepiso el valor de α_x y α_y calculado en función de la rigidez del marco y del sistema contraviento-disipador con los diseños finales de los elementos estructurales mencionados en secciones anteriores a ésta.

Se aprecia en estas tablas que las mayores diferencias entre los valores de α_x y α_y objetivos de diseño y los obtenidos en los diseños finales se presentan en el nivel 1 (planta baja), pues la condición de empotramiento perfecto aumenta de manera significativa la rigidez del primer entrepiso del marco y eso ocasiona que el balance objetivo (α) aumente. Sin embargo, si se consideran los resultados de los modelos con interacción suelo estructura (Nivel 1-ISE, tablas 6.33 a 6.35), se aprecia que se obtienen mejores aproximaciones con los valores α_x y α_y objetivos. Para el resto de los entrepisos, se aprecia de estas tablas que existe una variación menor entre el valor supuesto de α contra el calculado, debido al uso de secciones típicas y a la disminución de las secciones transversales conforme la altura. Por este motivo, en algunos entrepisos existe una mayor diferencia del valor α , sobre todo donde se presentan los cambios de sección de vigas, columnas o contravientos. Por cuestiones prácticas de diseño, se estableció que este parámetro no tuviera una variación mayor de ± 0.05 supuesto en los niveles que rigieron el diseño de secciones tipo de disipadores (a excepción del primer nivel en el modelo en base rígida), y que se cumpliera en al menos el 75% de los entrepisos del marco, para tomar como válido el balance de rigidez entre el sistema del marco y el del contraviento-disipador (α).

Tabla 6.33. Rigideces laterales del modelo 8 niveles, $\alpha_x=0.25$, $\alpha_y=0.35$, (unidades: t/m)

Nivel	ADAS			TADAS		PANEL DE CORTANTE		BRB		
	$K_{marco-X}$	$K_{CV-Disipador}$	α_x	$K_{CV-Disipador}$	α_x	$K_{CV-Disipador}$	α_x	$K_{marco-Y}$	$K_{CV-Disipador-Y}$	α_y
1-ISE	8,443	24,560	0.26	24,006	0.26	21,503	0.28	7,841	13,602	0.37
1	13,543	24,560	0.36	24,006	0.36	21,503	0.39	12,204	13,602	0.47
2	7,259	24,560	0.23	24,006	0.23	21,503	0.25	7,121	13,602	0.34
3	7,259	22,457	0.24	20,617	0.26	19,515	0.27	7,121	15,398	0.32
4	5,933	22,457	0.21	20,617	0.22	19,515	0.23	5,589	15,398	0.27
5	5,234	22,457	0.19	20,617	0.20	19,515	0.21	4,615	15,398	0.23
6	4,682	12,279	0.28	11,435	0.29	11,422	0.29	3,930	8,283	0.32
7	4,117	12,279	0.25	11,435	0.26	11,422	0.26	3,435	8,283	0.29
8	2,774	2,291	0.55	3,512	0.44	4,051	0.41	2,113	2,068	0.51

Tabla 6.34. Rigideces laterales del modelo 15 niveles, $\alpha_x=0.35$, $\alpha_y=0.50$, (unidades: t/m)

Nivel	ADAS			TADAS		PANEL DE CORTANTE		BRB		
	$K_{marco-X}$	$K_{CV-Disipador}$	α_x	$K_{CV-Disipador}$	α_x	$K_{CV-Disipador}$	α_x	$K_{marco-Y}$	$K_{CV-Disipador-Y}$	α_y
1-ISE	47,646	65,364	0.42	94,078	0.34	68,759	0.41	55,759	49,291	0.53
1	128,126	65,364	0.66	94,078	0.58	68,759	0.65	131,798	49,291	0.73
2	32,623	65,364	0.33	94,078	0.26	68,759	0.32	48,407	49,291	0.50
3	32,623	65,364	0.33	94,078	0.26	68,759	0.32	48,407	49,291	0.50
4	32,623	54,991	0.37	85,299	0.28	61,785	0.35	48,407	41,899	0.54
5	32,623	54,991	0.37	85,299	0.28	61,785	0.35	43,598	41,899	0.51
6	31,545	54,991	0.36	85,299	0.27	61,785	0.34	37,701	41,899	0.47
7	31,545	54,991	0.36	85,299	0.27	61,785	0.34	37,701	41,899	0.47
8	31,545	42,370	0.43	58,682	0.35	45,581	0.41	37,701	30,271	0.55
9	25,459	42,370	0.38	58,682	0.30	45,581	0.36	32,963	30,271	0.52
10	21,342	42,370	0.33	58,682	0.27	45,581	0.32	29,282	30,271	0.49
11	20,482	42,370	0.33	58,682	0.26	45,581	0.31	27,314	30,271	0.47
12	20,482	27,027	0.43	27,701	0.43	32,113	0.39	27,314	17,402	0.61
13	13,203	27,027	0.33	27,701	0.32	32,113	0.29	19,308	17,402	0.53
14	9,741	16,820	0.37	13,249	0.42	18,005	0.35	14,931	9,024	0.62
15	9,741	16,820	0.37	13,249	0.42	18,005	0.35	14,931	9,024	0.62

Tabla 6.35. Rigideces laterales del modelo 24 niveles, $\alpha_x=0.50$, $\alpha_y=0.65$, (unidades: t/m)

	ADAS			TADAS		PANEL DE CORTANTE		BRB		
Nivel	K _{marco-X}	K _{CV-Disipador}	α _x	K _{CV-Disipador}	α _x	K _{CV-Disipador}	α _x	K _{marco-Y}	K _{CV-Disipador-Y}	α _y
1-ISE	133,037	69,507	0.66	96,092	0.58	81,609	0.62	135,376	54,034	0.71
1	552,333	69,507	0.89	96,092	0.85	81,609	0.87	519,760	54,034	0.91
2	82,788	69,507	0.54	96,092	0.46	81,609	0.50	122,222	54,034	0.69
3	82,788	69,507	0.54	96,092	0.46	81,609	0.50	122,222	54,034	0.69
4	82,788	65,093	0.56	96,092	0.46	81,609	0.50	122,222	58,229	0.68
5	79,564	65,093	0.55	96,092	0.45	81,609	0.49	130,482	58,229	0.69
6	75,879	65,093	0.54	96,092	0.44	81,609	0.48	137,046	58,229	0.70
7	75,879	65,093	0.54	96,092	0.44	81,609	0.48	137,046	58,229	0.70
8	75,879	65,418	0.54	87,564	0.46	79,672	0.49	137,046	38,809	0.78
9	75,879	65,418	0.54	87,564	0.46	79,672	0.49	114,369	38,809	0.75
10	75,879	65,418	0.54	87,564	0.46	79,672	0.49	98,132	38,809	0.72
11	74,849	65,418	0.53	87,564	0.46	79,672	0.48	95,996	38,809	0.71
12	74,849	49,056	0.60	63,754	0.54	59,203	0.56	95,996	30,170	0.76
13	74,849	49,056	0.60	63,754	0.54	59,203	0.56	95,996	30,170	0.76
14	59,134	49,056	0.55	63,754	0.48	59,203	0.50	82,152	30,170	0.73
15	48,872	49,056	0.50	63,754	0.43	59,203	0.45	71,798	30,170	0.70
16	48,206	49,056	0.50	63,754	0.43	59,203	0.45	70,023	30,170	0.70
17	48,206	31,359	0.61	38,073	0.56	47,931	0.50	70,023	19,413	0.78
18	34,564	31,359	0.52	38,073	0.48	47,931	0.42	52,743	19,413	0.73
19	26,940	31,359	0.46	38,073	0.41	47,931	0.36	42,303	19,413	0.69
20	26,940	31,359	0.46	38,073	0.41	47,931	0.36	42,303	19,413	0.69
21	26,611	18,378	0.59	18,227	0.59	25,798	0.51	41,299	11,987	0.78
22	17,763	18,378	0.49	18,227	0.49	25,798	0.41	31,046	11,987	0.72
23	13,331	14,790	0.47	10,564	0.56	14,179	0.48	24,871	4,694	0.84
24	13,331	14,790	0.47	10,564	0.56	14,179	0.48	24,871	4,694	0.84

6.8 Cumplimiento de las Distorsiones de Entrepiso Permisibles

Uno de los requisitos indispensables en el proceso de diseño fue que las distorsiones de entrepiso no excedieran los máximos permisibles propuestos en el capítulo cuatro del presente documento, tanto para las condiciones de servicio asociado al control de daño de elementos no estructurales (figura 4.28), como a la limitación de daño de los elementos del marco cuando los disipadores desarrollan su ductilidad última (figura 4.29).

6.8.1 Estado Límite de servicio

Para la definición de la distorsión máxima de entrepiso asociada a consideraciones de servicio o de daño a elementos no estructurales, se tomó en cuenta la propuesta de diseño expuesta en capítulos anteriores (figura 4.28). Se consideró una distorsión máxima permisible de $\Delta_y=0.003$ (ec. 6.4):

$$\delta \left(\frac{Q'R}{7} \right) \leq 0.003 \quad (6.4)$$

donde:

δ : Distorsión de entrepiso resultante de las combinaciones sísmicas calculadas con el espectro de diseño

Q' : Factor de reducción de fuerzas sísmicas con fines de diseño

R : Factor de reducción por sobrerresistencia

En las figuras 6.29 a 6.32 se aprecian las distorsiones para todos los modelos en estudio; en color rojo y con línea discontinua se aprecian los valores límites propuestos; en color verde las distorsiones para la dirección x ; y en color morado las distorsiones para la dirección y . En las figuras 6.29 y 6.30 se aprecia que conforme los modelos incrementan en altura, los valores de distorsiones incrementan sin exceder el máximo permisible en ninguno de los casos. También se aprecia de éstas, que los valores de distorsión en la dirección x siempre son mayores que los de la dirección y (figura 6.29 y 6.30), y esta tendencia se acentúa cuando se toma en cuenta la interacción suelo – estructura (figura 6.30), debido a que el sistema del marco siempre aporta mayor rigidez al sistema global en esa dirección.

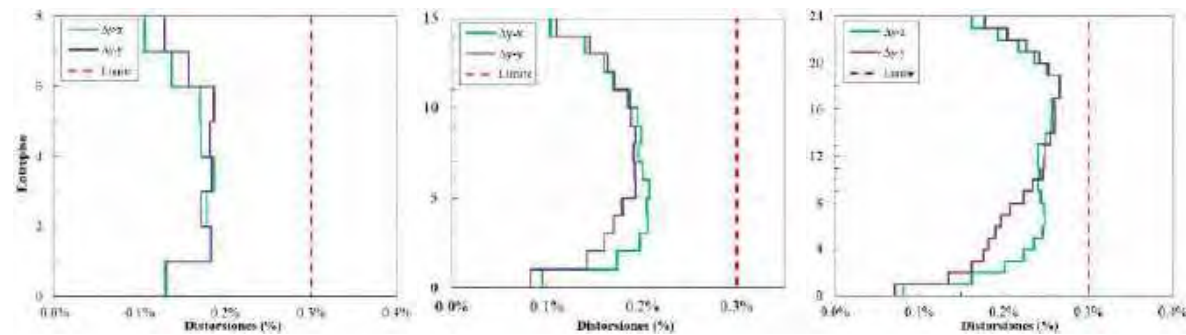


Figura 6.29. Distorsiones de servicio con base rígida

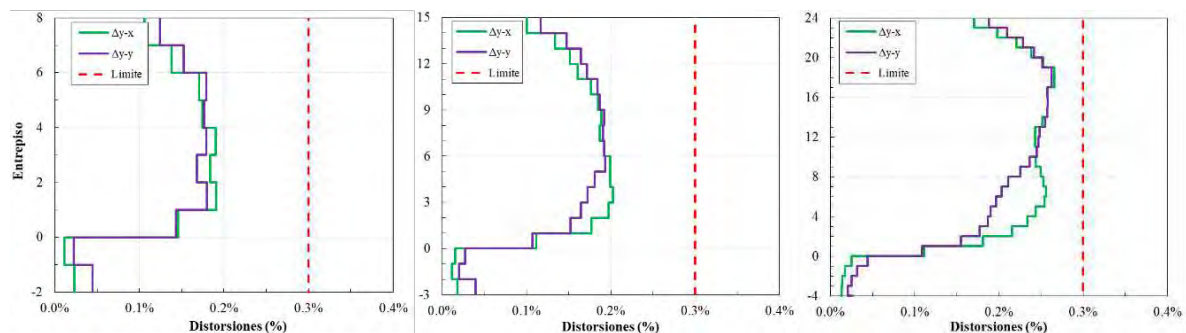


Figura 6.30. Distorsiones de servicio con base flexible

Si se compara el perfil de distorsiones entre la consideración de base rígida (figura 6.29) y la consideración con base flexible (figura 6.30), se aprecia que el considerar efectos de interacción suelo-estructura se incrementa la magnitud de las distorsiones en un 10% en promedio. Por otra parte, se observa que las distorsiones en los niveles de los sótanos para los modelos con interacción suelo-estructura (figura 6.30), no son mayores a 0.05% para ninguno de los tres modelos considerados, siendo la dirección y donde se presentan los mayores valores debido a que es en ésta donde se tiene mayor relación de esbeltez (H/L).

6.8.2 Estado límite de prevención de daño a elementos del marco

Para la definición de la distorsión máxima permisible asociada a limitación de daños para vigas y columnas (comportamiento resiliente) cuando el dissipador desarrolla su ductilidad objetivo, se consideró el promedio de los valores obtenidos de los análisis estáticos no lineales presentados en el capítulo cuatro (figura 4.29). Se consideró una distorsión máxima $\Delta_u=0.015$ (ec. 6.5) :

$$\delta(QR) \leq 0.015 \quad (6.5)$$

El valor propuesto es similar al que se propone desde hace tiempo para los marcos de acero o concreto con contravientos concéntricos (NTCS-04 2004, NTCS-17 2017, MOC-08 2009, MOC-15 2015). En las figuras 6.31 y 6.32 se aprecian las distorsiones últimas para los edificios diseñados; en ambas se aprecian la misma tendencia que para las condiciones de servicio, donde conforme los modelos incrementan en altura, los valores de las distorsiones también incrementan.

Comparando las dos consideraciones tomadas para el modelado de la base de los edificios, se aprecia que los valores de distorsiones de mayor magnitud se desarrollaron en la dirección y cuando los modelos se consideraron con base rígida y caso contrario cuando se consideraron con base flexible. Además, en el modelo de ocho niveles es donde se desarrollan las mayores de distorsiones para los niveles de sótano en comparación con los modelos de 15 y 24 niveles (figura 6.32). Lo anterior se debe a que en el modelo de ocho niveles está desplantado sobre pilotes de fricción, lo que permite mayor capacidad de rotación a la zona del cajón, mientras que los modelos restantes se diseñaron con pilotes de punta desplantadas hasta la profundidad de su estrato firme.

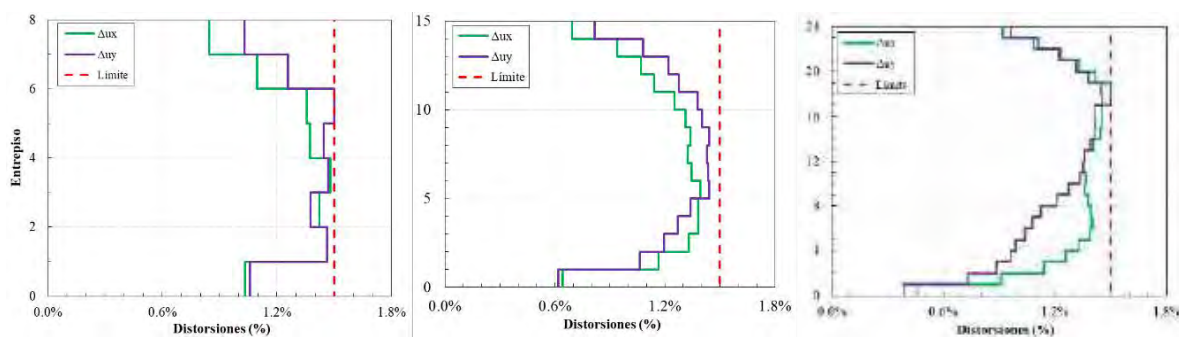


Figura 6.31. Distorsiones últimas con base rígida

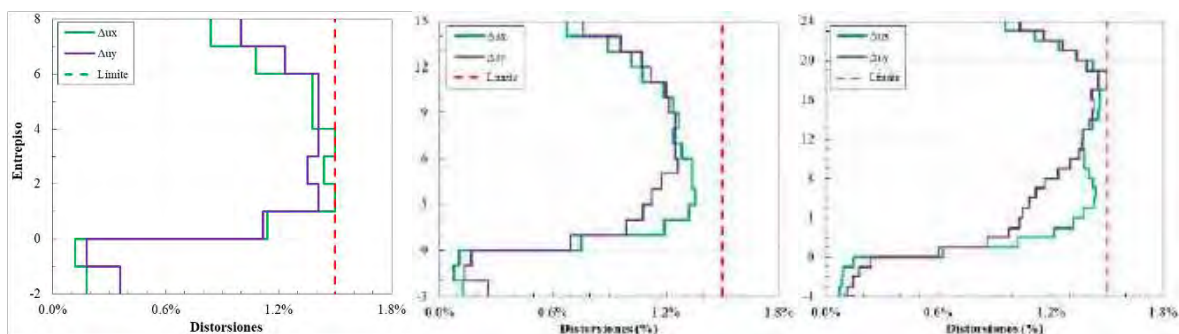


Figura 6.32. Distorsiones últimas con base flexible

6.9 Comentarios finales de los diseños

El objetivo primordial de este trabajo es ofrecer un procedimiento de diseño que sea fácil de adaptar a la filosofía de los reglamentos nacionales vigentes; por ende, se propusieron parámetros de reducción sísmicos asociados a la ductilidad (Q) y a la sobrerresistencia (R) para afectar al espectro de respuesta y en conjunto a un análisis modal espectral hacer la revisión por resistencia y desplazamiento de todos los elementos estructurales involucrados. En la figura 6.1 se resume el proceso de diseño llevado a cabo por el autor a lo largo de este capítulo. En la primera parte del proceso, se toman en cuenta análisis estáticos lineales con el objetivo de distribuir cortantes de entrepiso entre el sistema del marco y el del contraviento-disipador en función del parámetro α ; se realiza un modelo analítico con sólo los elementos estructurales de los marcos a momento que servirá como pre-diseño para vigas y columnas. En esta etapa de pre-diseño se observó que si no se incluye en una condición de carga la contribución axial de los contravientos, a pesar que no se toman en cuenta en este primer modelo analítico, las columnas resultan con una sección transversal más pequeña que la requerida en la etapa final de diseño y tendrá como consecuencia un mayor número de iteraciones.

En la segunda etapa del proceso de diseño, se toman en cuenta todos los elementos estructurales en un mismo modelo analítico y se efectúa un análisis modal espectral para el diseño primero de disipadores, luego contravientos, y finalmente la revisión de vigas y marcos. Es importante recalcar que en este modelo analítico se debe considerar la longitud de los dispositivos de disipación de energía, dado que está estrechamente ligada al ángulo de contraviento y a la longitud de éste, por lo que se sugiere una longitud de disipadores que no afecte considerablemente el ángulo del contraviento de soporte del modelo, en comparación con el ángulo que se utilizaría en la colocación de dicho elemento. Se observó de las tablas 6.21 a 6.23 que las secciones propuestas de los contravientos, para los modelos de 15 y 24 niveles, se diseñaron a menos del 50% de su capacidad. El principal motivo radica en que la longitud del contraviento estaba limitado a la altura libre de cada entrepiso y a la configuración chevrón utilizada. Probablemente, muchos ingenieros de la práctica preferirían diseñar a los contravientos al límite de su capacidad; pero cabe recordar que para que el disipador de energía desarrolle su ductilidad máxima, los contravientos de soporte no deben fallar. Por tal motivo, se podrían evaluar otras configuraciones de este sistema o seleccionar

otro balance de rigidez α , pero sin olvidar que a mayor altura del edificio, mayor debe de ser la contribución del sistema del marco para limitar su participación no lineal.

El diseño por resistencia de vigas y columnas se hace conforme a los requisitos establecidos para marcos con ductilidad limitada ($Q=2$), pero agregando los requisitos mínimos para el refuerzo transversal de marcos dúctiles ($Q=4$). En otras palabras, no se tiene que seguir el proceso completo de diseño para un marco dúctil, sino revisar que el diámetro, ramas y separación de los estribos sea tal que asegure una mayor capacidad de deformación en la zona donde se espera que se plastifique la sección. No obstante, algunos ingenieros de la práctica pudieran objetar que las secciones finales de diseño pudieran parecer más robustas de lo habitual, es importante recalcar que el uso de un sistema de control de la respuesta sísmica buscar mejorar el desempeño estructural completo del sistema focalizando el daño en estos fusibles estructurales. Como consecuencia, de esto se tendrán diseños resilientes, que además de preservar la integridad de los ocupantes, el proceso de reparación después de un sismo de gran magnitud será casi nulo. Se debe tomar en cuenta, además, que en un edificio estándar, el costo de la estructura oscila entre 20% y 30% del costo total del edificio, pues los mayores costos iniciales están asociados a las instalaciones y a los acabados (Tena 2018) y que conforme se expuso en el capítulo 4 y en Nangullasmú y Tena (2016), el sobre costo adicional por dar un detallado dúctil oscila entre 6.24% y 12.36% del costo de la estructura del marco de concreto (vigas y columnas), pues los contravientos, los disipadores y la cimentación serían los mismos. Si se supone que por el gasto adicional en la mano de obra, se incrementara el costo de la estructura hasta en un 10% (muy exagerada y conservadora estimación), y suponiendo un costo del 30% de lo que realmente resiste los sismos sin el detallado dúctil, entonces el costo total de la estructura con un detallado dúctil aplicado de manera voluntaria sería del 33.3%, es decir, sólo impactaría el 3.3% más del costo total del proyecto del edificio y asegurar, en la medida de lo posible, que éste sea 100% resiliente.

6.10 Propuesta actualizada de periodos de vibrar

Con base en los resultados obtenidos en los modelos de marcos planos evaluados en capítulos anteriores y de los resultados de los modelos tridimensionales de esta sección (figura 6.33), se realiza una nueva propuesta para estimar el periodo de vibrar de edificios de concreto reforzado con disipadores histeréticos de energía, en función de la altura en metros del modelo a evaluar:

$$T = 0.3(H)^{0.35} \quad (6.6)$$

Se observó a partir de los resultados obtenidos con los modelos tridimensionales, resumidos en la tabla 6.36, que éstos son más rígidos que los marcos planos estudiados en el capítulo cuatro. Esto es consecuencia de limitar la distorsión última que los modelos desarrollarán (ecuación 6.5), por el modelado tridimensional riguroso para la zona rígida, que se toma en cuenta para los modelos de este capítulo, y en conjunto con la nueva combinación de carga impuesta a las columnas conectadas al sistema contraviento – disipador de modelos esbeltos,

con el objetivo de excluirlas de participación no lineal. Como se comentó en párrafos anteriores, el uso de esta nueva combinación hace que las columnas sean más robustas en su sección transversal (figura 6.15), y por ende disminuya su periodo de vibrar. Además, se aprecia que con la nueva ecuación 6.6, la relación entre el periodo obtenido con el modelo analítico y el estimado es más adecuada (tabla 6.36). Sin embargo, se observa que conforme los modelos se hacen más flexibles, la estimación del periodo es más adecuada con la nueva propuesta, independientemente de las diferencias en el modelado de la base del edificio.

Tabla 6.36. Características dinámicas de los edificios

Modelo	Modo	Periodo T(s)	Participación Modal			H (m)	Periodo Estimado	T _{modelo} / T _{estimado}
			EW	NS	θ_z			
8N BR	1	0.928	0.00	74.35	0.16	32	1.01	0.92
	2	0.798	76.45	0.01	0.21	32	1.01	0.79
	3	0.590	0.21	0.15	75.21	-	-	-
8N ISE	1	1.086	0.00	62.92	0.11	32	1.01	1.08
	2	0.909	65.72	0.00	0.17	32	1.01	0.90
	3	0.675	0.17	0.08	67.35	-	-	-
15N BR	1	1.080	0.06	69.12	0.26	60	1.26	0.86
	2	1.030	72.36	0.06	0.15	60	1.26	0.82
	3	0.750	0.16	0.23	70.80	-	-	-
15N ISE	1	1.238	0.02	64.69	0.25	60	1.26	0.98
	2	1.156	67.19	0.03	0.18	60	1.26	0.92
	3	0.868	0.17	0.19	70.74	-	-	-
24N BR	1	1.477	0.07	64.88	0.22	96	1.48	1.00
	2	1.425	68.76	0.07	0.11	96	1.48	0.96
	3	1.015	0.12	0.18	68.51	-	-	-
24N ISE	1	1.672	0.01	55.76	0.12	96	1.48	1.13
	2	1.548	57.57	0.01	0.08	96	1.48	1.05
	3	1.095	0.07	0.09	59.51	-	-	-

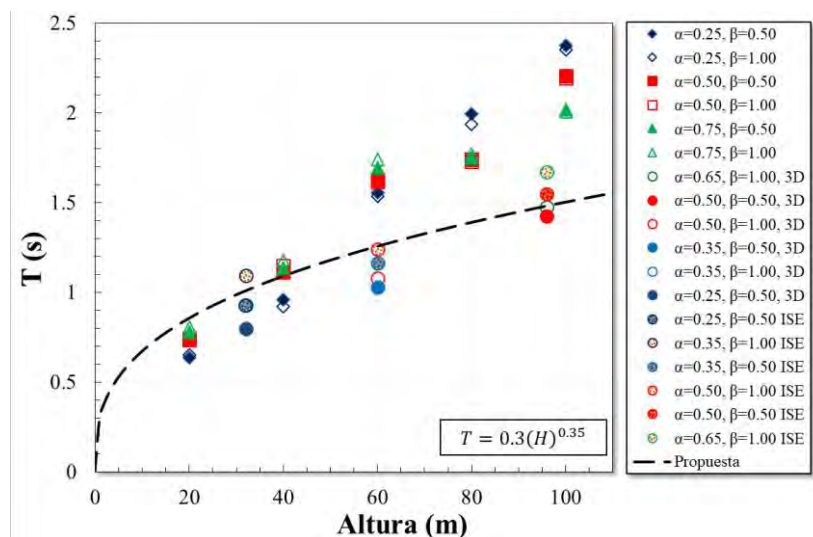


Figura 6.33. Propuesta para estimación de periodo de vibrar

7. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS MODELOS TRIDIMENSIONALES CON BASE EN ANÁLISIS ESTÁTICOS NO LINEALES

7.1 Introducción

En este capítulo se evalúa el comportamiento sísmico de los diseños de los modelos del capítulo anterior, a partir de los resultados de análisis estáticos no lineales. En primera instancia, se presentan las consideraciones generales tomadas en cuenta para este tipo de análisis; y posteriormente, se comentan los resultados obtenidos a partir de dos diferentes patrones de carga. Dichos resultados se presentan de forma gráfica, en cada una de las direcciones en estudio, para evaluar los siguientes parámetros:

- a) Curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea
- b) Cortantes de entrepiso normalizadas con el peso total de la estructura
- c) Mapeo de fluencias inelásticas

7.2 Consideraciones generales

Se realizaron análisis estáticos no lineales bajo cargas laterales monótonas crecientes para los modelos tridimensionales diseñados en el capítulo seis, con el programa MIDAS Gen (MIDAS 2017). Para estos análisis se tomaron en cuenta como condición de carga inicial la suma de las cargas permanentes y de la carga viva accidental; además, se incluyeron efectos de segundo orden $P-\Delta$. Asimismo, se hace la comparativa de los resultados obtenidos ante dos patrones de carga lateral; la primera, toma en cuenta la distribución de fuerzas generada a partir de la ecuación A.11 de las NTCS-04 y está representada en la figura 7.1 y 7.2 con línea continua; la segunda, toma la distribución de fuerzas a partir de la forma modal representativa de la dirección de análisis y está simbolizada con línea discontinua en las mismas figuras antes mencionadas.

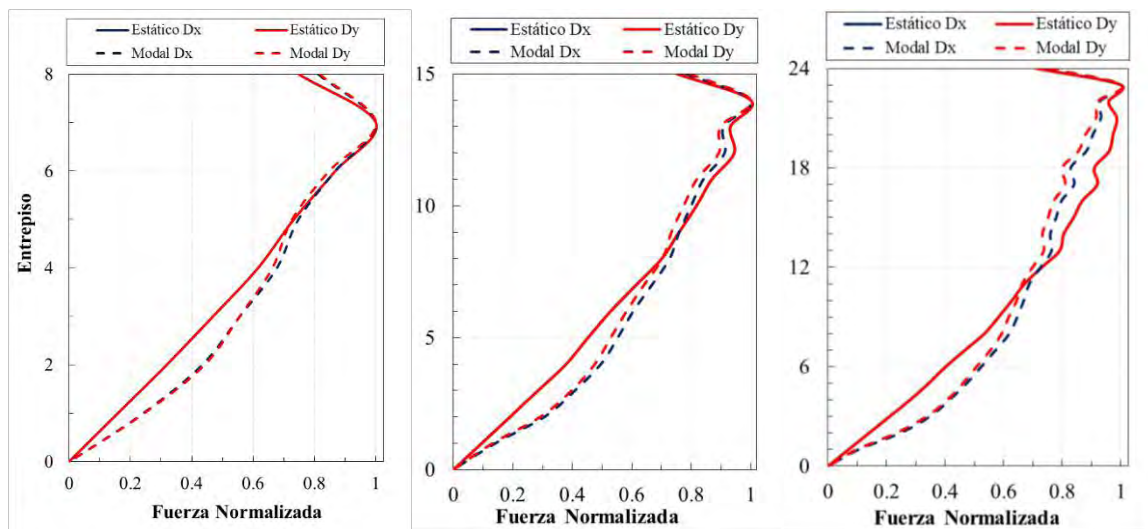


Figura 7.1. Patrones de carga para análisis estáticos no lineales con base rígida

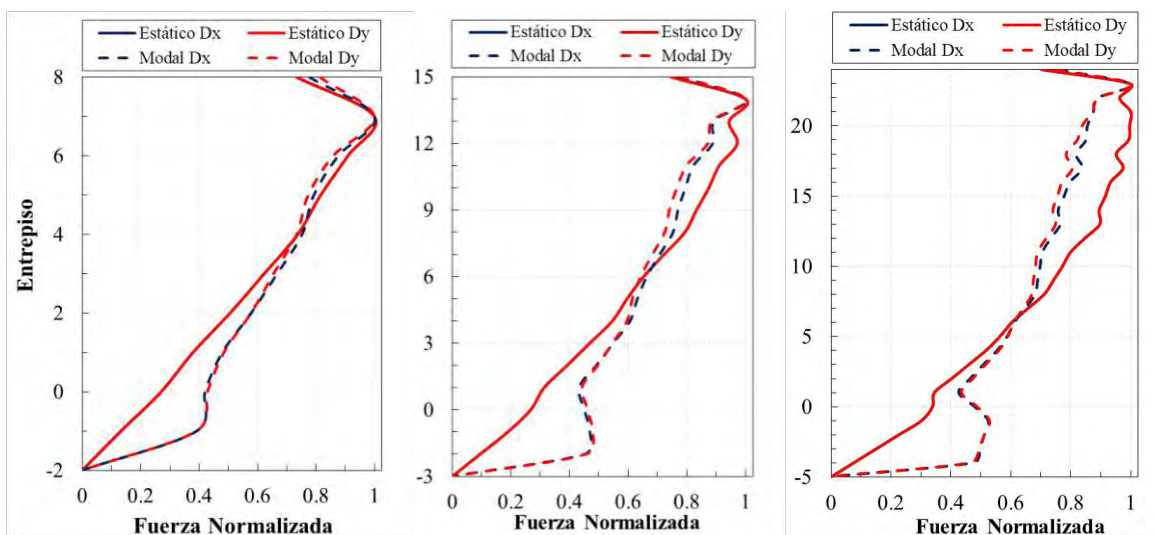


Figura 7.2. Patrones de carga para análisis estáticos no lineales con base flexible

En la figura 7.1 están representadas los patrones de carga inducidos a los modelos con base rígida; mientras que en la figura 7.2 se observan los patrones de carga a los cuales fueron sometidos los modelos tomando en cuenta efectos de interacción suelo-estructura. Se aprecia de éstas que las cargas que se adaptan a la forma modal de la estructura (línea discontinua), son mayores que las del patrón estático en los primeros entresijos del edificio, sobre todo para la zona de los cajones de cimentación (figura 7.2). Por otra parte, los valores del patrón de carga estático se incrementan a partir de la segunda mitad de la altura del modelo, con respecto a las del patrón de carga modal y este efecto se ve más acentuado conforme los modelos aumentan en altura.

Los elementos de concreto reforzado se idealizaron como elementos tipo viga-columna, considerando la posible formación de fluencias inelásticas a los extremos de éstos; y sus propiedades no lineales (diagramas momento-curvatura y de interacción), se obtuvieron empleando el modelo constitutivo de Kent y Park (1986). Los contravientos metálicos se idealizaron como elementos que sólo admiten carga axial (tensión o compresión). Los disipadores de energía (ADAS y BRBs), se modelaron como elementos tipo liga, los cuáles son resortes a los que se les da la propiedad de rigidez elástica, rigidez post-fluencia y resistencia a fluencia del elemento.

Todos los análisis estáticos no lineales se detuvieron cuando los disipadores tipo ADAS (dirección x), desarrollaban una ductilidad máxima de 12; y cuando los disipadores tipo BRB (dirección y), desarrollaban una ductilidad máxima de 10. Se decidió parar los análisis a esa magnitud de ductilidad, porque se supuso que a ese valor los dispositivos se desconectan del contraviento de soporte, o en otras palabras, dejan de funcionar como elemento estructural.

7.3 Resultados de análisis estáticos no lineales

7.3.1 Curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea

En las figuras 7.3 a 7.6 se presentan las curvas de cortante basal normalizado-distorsión global de azotea para todos los modelos evaluados con el patrón de carga estática. Las curvas generadas con el patrón de carga modal se encuentran en el apéndice D, debido a que en este tipo de gráficas existen diferencias poco perceptibles para compararlas directamente. Se exhiben cuatro curvas diferentes en cada figura para comparar el comportamiento no lineal de columnas interiores (celeste), columnas exteriores (azul), sistema contraviento-disipador (rojo) y el sistema global (verde o morado según la dirección de análisis). Además, se aprecia de cada una de estas figuras líneas verticales asociadas a la primera fluencia de los elementos estructurales involucrados (disipador, viga y columna), dado que los contravientos se comportaron de manera elástica para todos los casos de estudio. En el eje de las ordenadas se presenta el cociente entre el cortante basal desarrollado y el cortante de diseño para la revisión del factor de sobrerresistencia (R) que desarrolla el sistema global y cada sistema por separado. En el eje de las abscisas se presentan la distorsión a nivel de azotea que los diferentes sistemas desarrollan en términos de porcentaje.

Se observa de manera general que conforme el sistema del marco aporta mayor rigidez al sistema global (incremento del valor α), el cortante que desarrollan las columnas exteriores es mucho mayor también, sin importar la forma de modelar la base de los edificios o la dirección de análisis. Si se comparan las curvas desarrolladas por el sistema global, se aprecia que si se modelan los edificios con base rígida, la sobrerresistencia que desarrollan disminuye ligeramente conforme el modelo aumenta en altura para la dirección x , con diferencias del 9% aproximadamente entre los valores desarrollados entre el modelo de ocho y 24 entrepisos (figura 7.3). En cambio, si se modela la interacción suelo-estructura, dicha tendencia antes mencionada se revierte (figura 7.5), con diferencias de hasta el 20% entre los valores de sobrerresistencia que el sistema global logra desarrollar.

De manera general, se observa un buen comportamiento en la secuencia de daño esperada para los modelos evaluados; es decir, en todos los casos el disipador es el elemento que fluye primero. Aunque se esperaba que la participación no lineal se desarrollara exclusivamente en los dispositivos disipadores de energía, con algunas fluencias incipientes en vigas, se aprecia que para el modelo de 24 niveles en la dirección y (figura 7.4c), se presenta la fluencia en alguna columna de ese modelo para cuando los disipadores desarrollan su ductilidad objetivo ($8 \leq \mu_d \leq 10$). Para el caso cuando se considera la interacción suelo-estructura, se observa que exclusivamente el modelo de 15 niveles presenta un comportamiento estructural resiliente, es decir, los disipadores son los elementos estructurales fusibles y no existe fluencia en ninguna columna (figura 7.5b y 7.6b). Para el caso del modelo de ocho entrepisos con base flexible (figura 7.5a), se observa que la primera fluencia en columnas se presenta en el último paso de carga, por lo que la magnitud de rotación asociada es pequeña, como se verá más adelante.

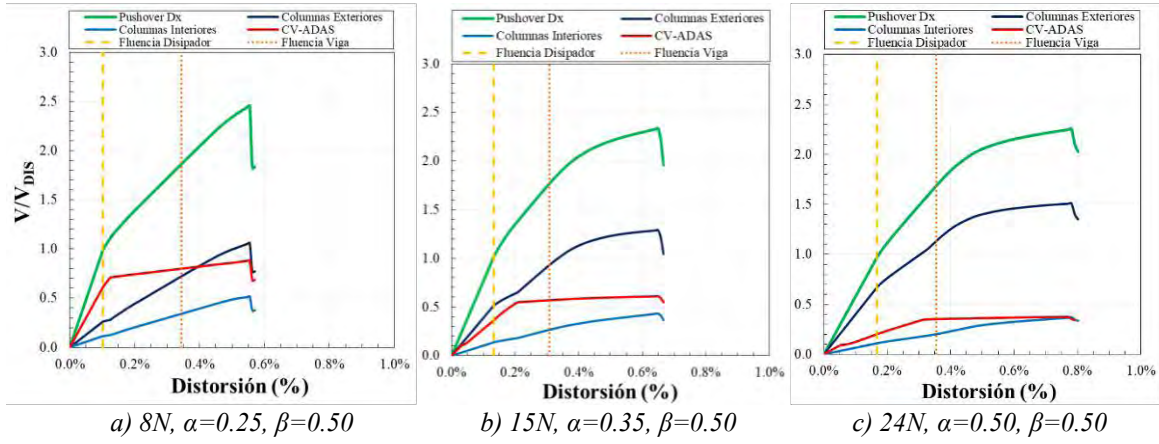


Figura 7.3. Curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea, base rígida, dirección x

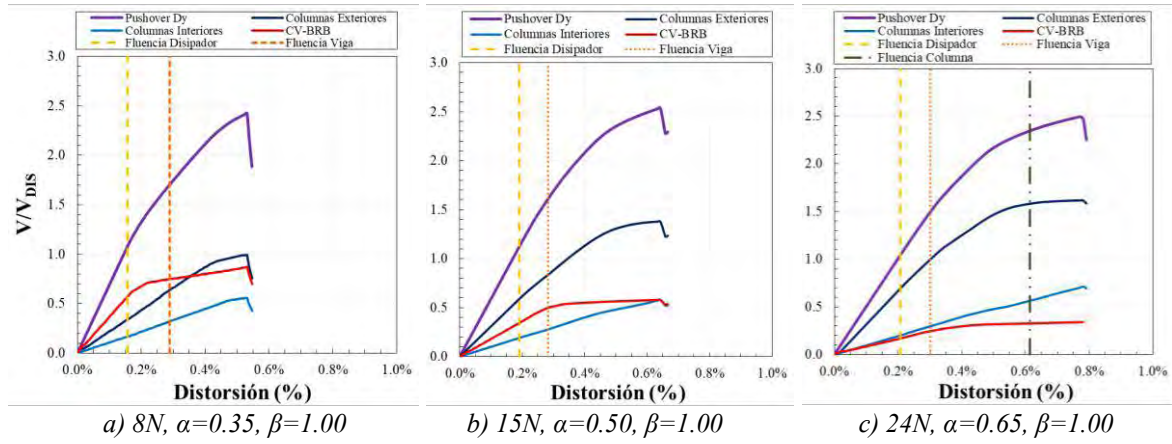


Figura 7.4. Curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea, base rígida, dirección y

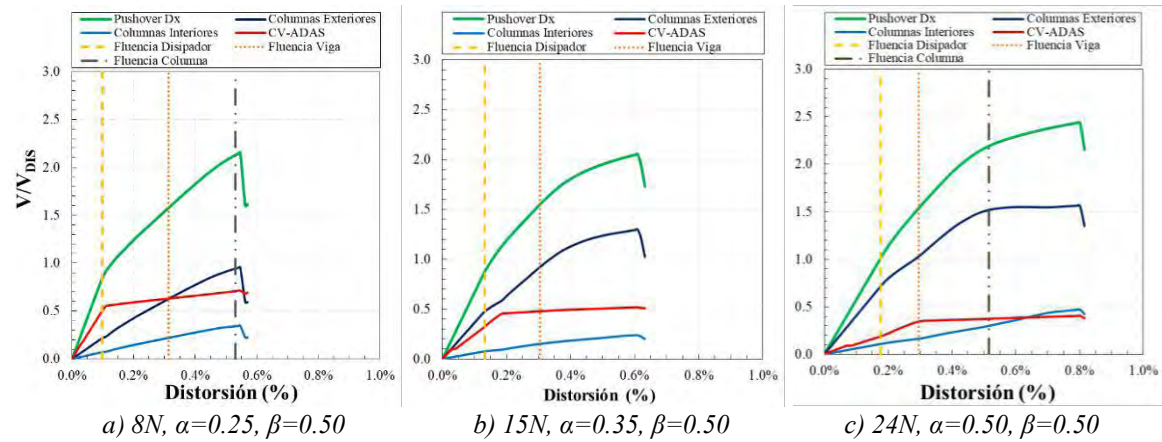


Figura 7.5. Curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea, base flexible, dirección x

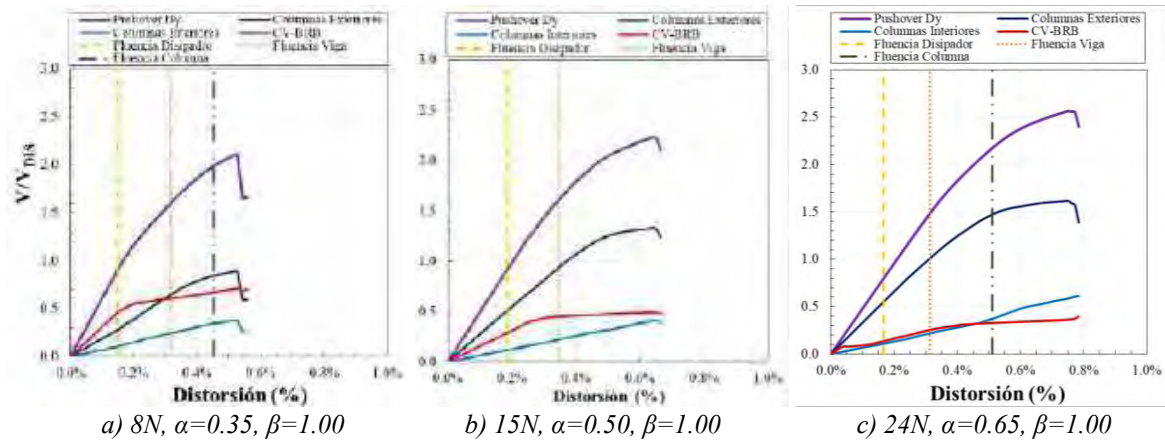


Figura 7.6. Curvas cortante basal normalizado-distorsión global de azotea, base flexible, dirección y

En las figuras 7.5 y 7.6 se muestra el comportamiento no lineal de los edificios descontando la participación del suelo y de la cimentación, es decir, se presentan los resultados producidos exclusivamente por la estructura. En la figura 7.7 se aprecian, de manera esquemática, los diferentes niveles de referencia que se obtuvieron para la obtención de cada una de dichas curvas de capacidad presentadas de las figuras 7.8 a 7.10. En primera instancia se tienen las curvas con etiqueta “Total con ISE”, donde se grafican el desplazamiento total del modelo (D_{az}) y el cortante basal producido al nivel más bajo de la zona de cimentación (V_{cim}). Luego, en la gráfica con letrero “Descontando ISE”, se tiene la participación no lineal exclusiva de la estructura; para esto, se descuenta el desplazamiento generado al nivel cero del terreno (D_o) y el cortante basal de referencia que se utiliza es al mismo nivel del desplazamiento antes mencionado (V_b). Finalmente, en la tercera gráfica con nombre “Cimentación”, se presenta la participación de la cimentación; en ésta se tiene en el eje de las abscisas el desplazamiento D_o , y en el eje de las ordenadas el resultado del cortante basal a nivel de cimentación menos la participación al nivel cero de terreno ($V_{cim} - V_b$).

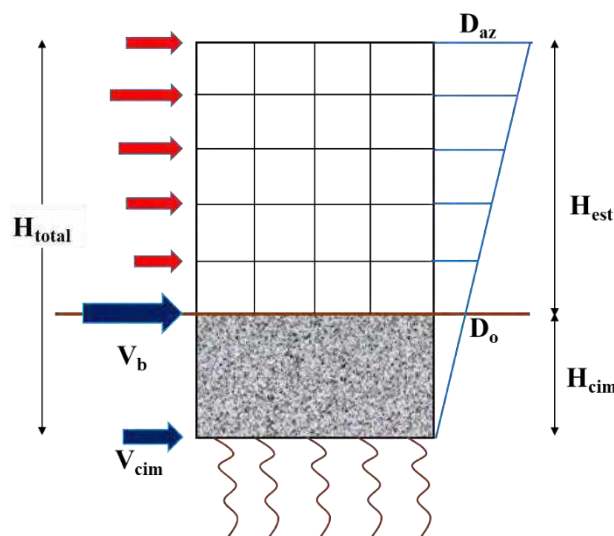


Figura 7.7. Cálculo de las curvas pushover con interacción suelo-estructura

Se aprecia de las figuras 7.8 a 7.10, que en las curvas con título “Descontando ISE”, se desarrollan mayores valores de distorsión en comparación con la gráfica con etiqueta “Total con ISE”. Esto se debe a que la altura de referencia en la primera de estas curvas es mayor (H_{total}), en comparación con la altura para la segunda curva antes mencionada (H_{est}). Sin embargo, los valores de sobrerresistencia que desarrollan los modelos para las dos consideraciones son similares, a pesar que los valores de fuerza cortante que se generan no son las mismas. Finalmente, en la tercera gráfica con título “Cimentación”, se observa para el modelo de ocho entrepisos que se genera una ligera curva (figura 7.8), dicho comportamiento es elástico y producto del efecto del cabeceo de la cimentación.

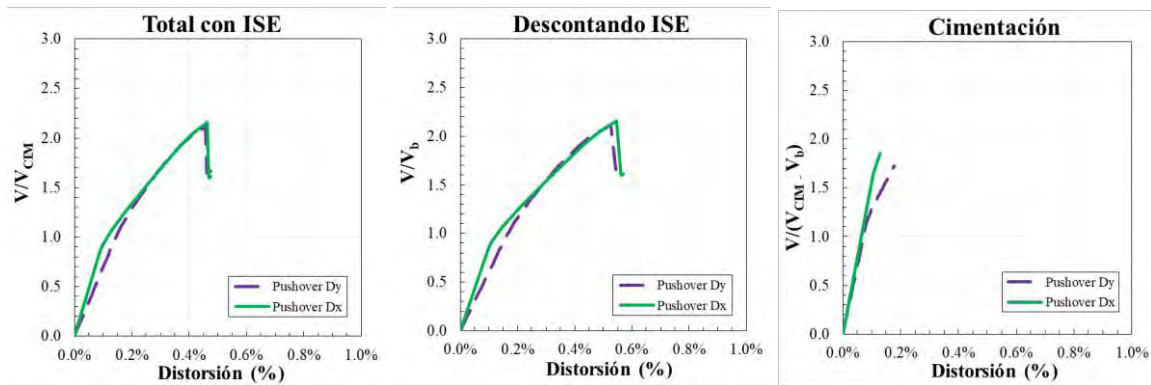


Figura 7.8. Curvas pushover con base flexible para modelos de ocho entrepisos

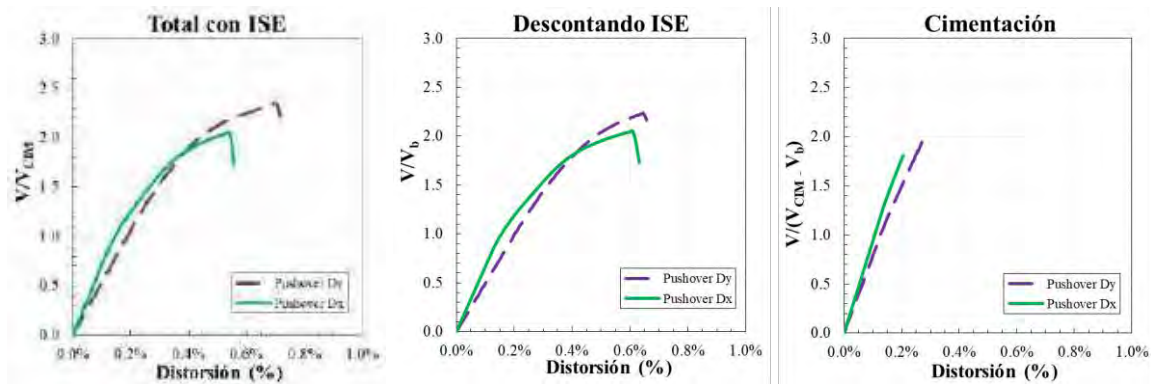


Figura 7.9. Curvas pushover con base flexible para modelos de 15 entrepisos

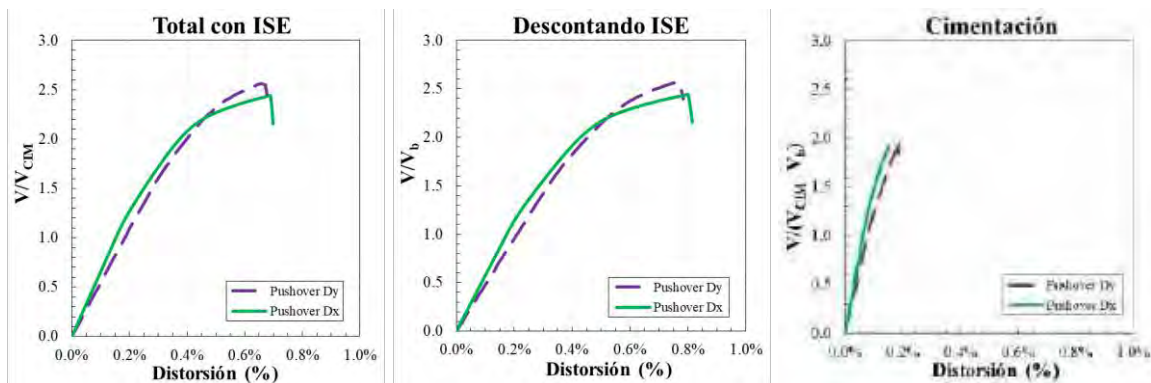


Figura 7.10. Curvas pushover con base flexible para modelos de 24 entrepisos

En las figuras 7.11 y 7.12 se presentan los desplazamientos ante el último paso de carga, obtenidos con los dos patrones antes mencionados (estático y modal). De manera general, se aprecia que para el modelo de ocho y 24 entrepisos, los desplazamientos obtenidos con el patrón de carga estática (figura 7.11), son mayores en comparación con el patrón de carga modal (figura 7.12). Conforme el modelo aumenta en número de entrepisos, dicha diferencia en los desplazamientos a nivel de azotea se va incrementando hasta en un 25%.

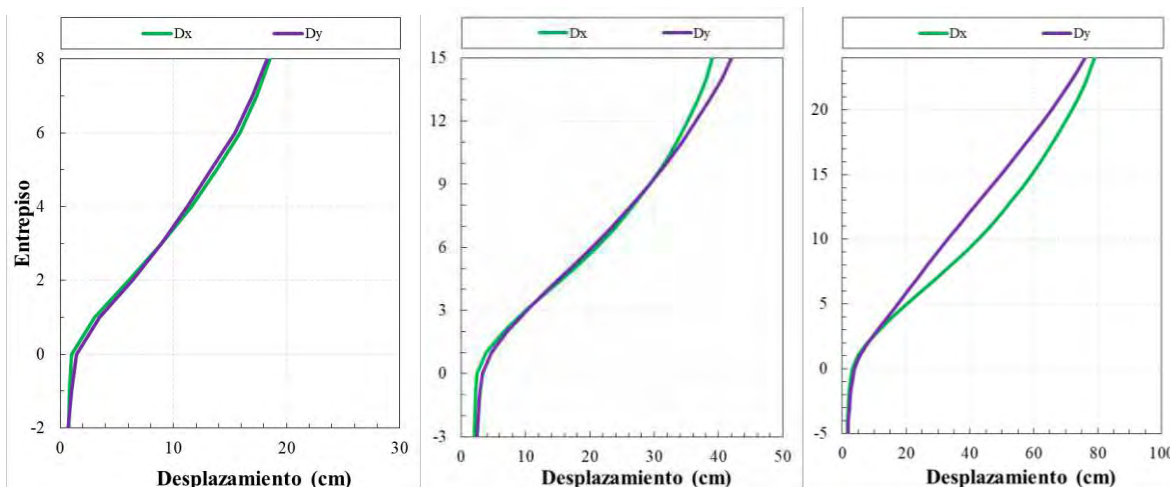


Figura 7.11. Desplazamiento lateral de los modelos debido al patrón de carga estática

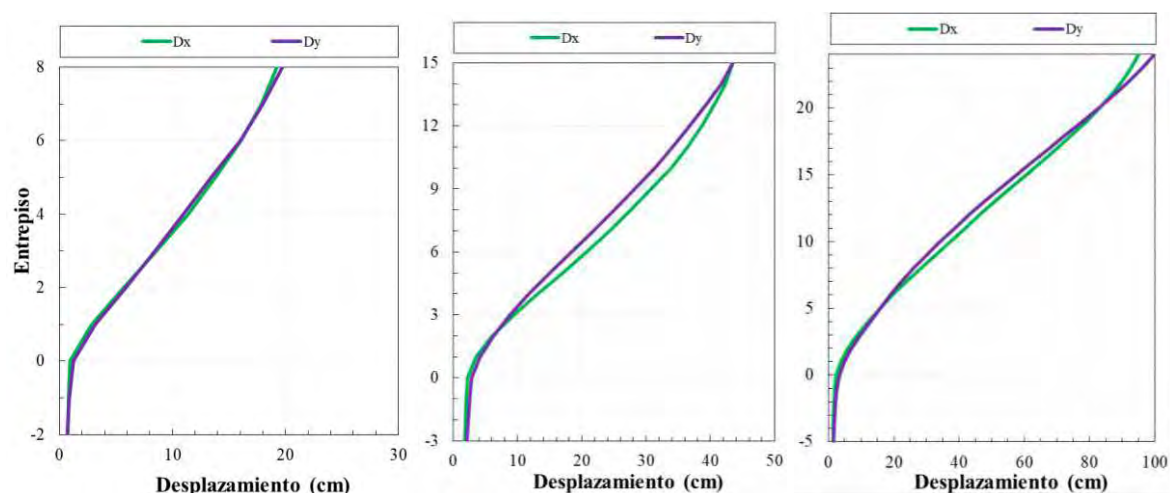


Figura 7.12. Desplazamiento lateral de los modelos debido al patrón de carga modal

En la figura 7.13 se grafican con diagramas de barras la participación del desplazamiento lateral de la cimentación con respecto al de la azotea, en términos de porcentaje, para cada modelo con el patrón de carga correspondiente. Se observa de éstas que usar un patrón de carga estática, además de incrementar el desplazamiento último de los modelos, también se incrementa la participación del desplazamiento de la cimentación. Para los modelos con 15 y 24 entrepisos, la participación en la dirección y es mucho mayor, debido a que es en ésta donde se tiene mayor relación de esbeltez (H/L).

En la figura 7.14 se presenta la participación del cabeceo de la cimentación con respecto al desplazamiento total de los modelos evaluados a nivel de azotea. De manera general, se aprecia que en la mayoría de los casos, el porcentaje de participación es mayor con respecto a los obtenidos en la figura 7.13. Además, los máximos valores se obtienen para el modelo de 15 entrepisos en la dirección y, donde se obtuvo que, aproximadamente el 14% del desplazamiento total es causado por el cabeceo de la cimentación (patrón estático). Por otra parte, los valores obtenidos para el modelo de ocho entrepisos son mayores que para el modelo de 24 niveles, donde los valores para éste último, son los valores con menor magnitud obtenidos de todos los modelos en estudio de este capítulo.

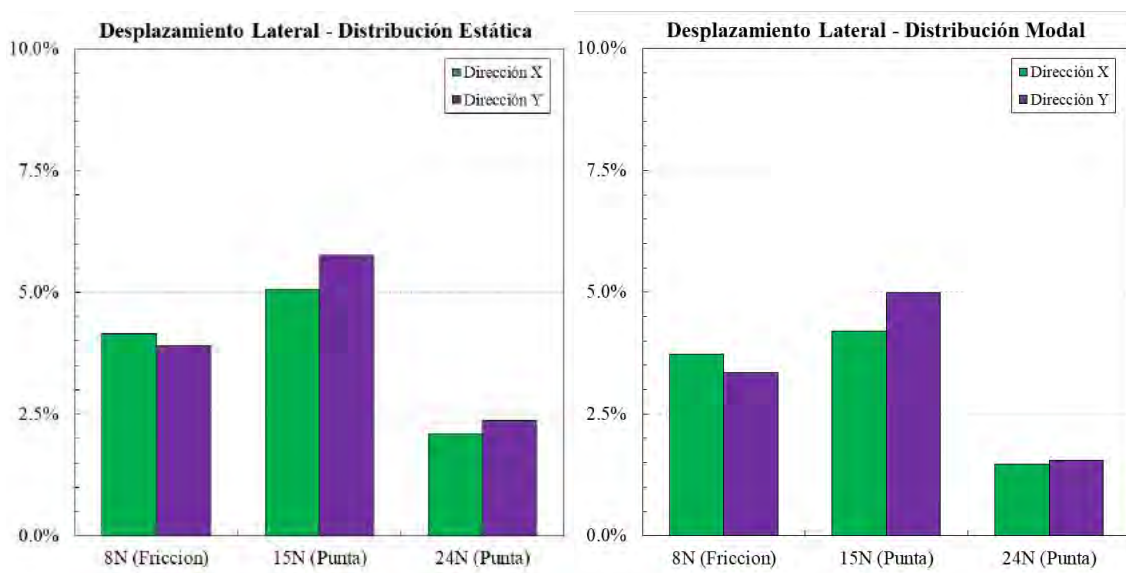


Figura 7.13. Desplazamiento lateral de la estructura debido a la cimentación

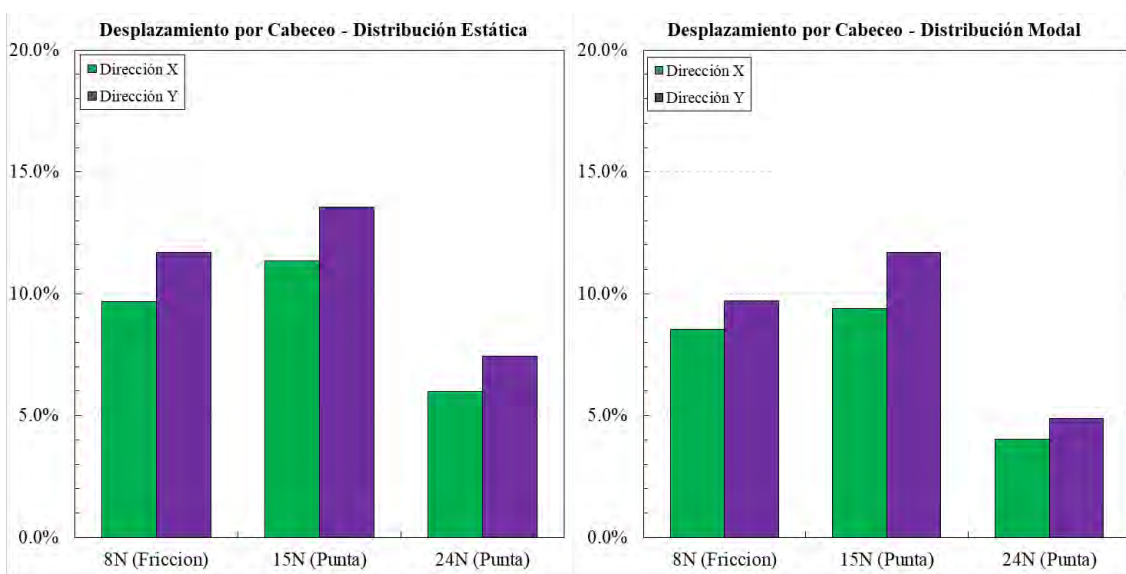


Figura 7.14. Cabeceo de la estructura debido a la cimentación

A partir de la observación de las curvas presentadas en las figuras 7.3 a 7.6 se obtiene o aprecia un panorama general del comportamiento global de las estructuras diseñadas y de estas curvas se obtienen valores de sobrerresistencia (R) y de ductilidad global (Q), a partir del procedimiento comentado en el capítulo 3 y apoyado de la figura 3.12. Estos parámetros, resumidos en la tabla 7.1, se obtuvieron a partir de una idealización bilineal donde su energía de deformación fuera equivalente a la de las curvas obtenidas de los análisis estáticos no lineales. De manera general, se observa que con el patrón de carga estática se obtienen mayores valores de ductilidad global y menores para el de sobrerresistencia comparado con los obtenidos por el patrón de carga modal. Además, de esta tabla se observa que cuando se descuentan los efectos de interacción suelo-estructura, los valores del parámetro Q disminuyen en todos los casos evaluados independientemente del patrón de carga inducido, y conforme el modelo es más flexible, esta diferencia se incrementa hasta en un 9% (modelo de 24 niveles). Las magnitudes obtenidas para R disminuyen en promedio en un 15% para los modelos de ocho y 15 niveles cuando se toman en cuenta la base como flexible (Descontando ISE). Sin embargo, para el caso del modelo de 24 niveles, este valor aumenta y es más notorio para la dirección y con el patrón de carga modal (tabla 7.1), debido a que para controlar la distorsión máxima permisible, se tuvo que incrementar la sección transversal de los elementos en mayor proporción que los otros modelos. Por último, para todos los casos en la dirección x , se desarrolla más ductilidad global que en su dirección ortogonal. Esto se debe a que la rigidez de los disipadores es igual al del contraviento de soporte para la dirección y , lo que provoca que el sistema estructural global tienda a ser más rígido en esa dirección y , por ende, desarrolle menor valor de Q . La razón por la que disminuyen tanto los valores de Q y R entre el modelo de base rígida y el modelo donde se toma en cuenta la interacción suelo-estructura, se debe al aporte elástico de los resortes y a la no linealidad de la estructura.

Tabla 7.1. Parámetros Sísmicos de modelos tridimensionales

MODELOS		Patrón de carga estático		Patrón de carga modal	
		<i>Q</i>	<i>R</i>	<i>Q</i>	<i>R</i>
8N	BR-Dx	4.44	2.46	4.56	2.41
	Total con ISE-Dx	3.85	2.15	4.18	2.01
	Descontando ISE-Dx	4.29	2.15	4.42	2.08
	BR-Dy	2.33	2.42	2.47	2.36
	Total con ISE-Dy	2.28	2.11	2.37	1.94
	Descontando ISE-Dy	2.30	2.11	2.42	2.02
15N	BR-Dx	2.97	2.33	3.14	2.23
	Total con ISE-Dx	2.67	2.05	2.78	1.90
	Descontando ISE-Dx	2.82	2.05	2.79	1.95
	BR-Dy	1.92	2.54	1.89	2.31
	Total con ISE-Dy	2.03	2.35	2.07	2.11
	Descontando ISE-Dy	1.85	2.24	1.70	2.06
24N	BR-Dx	2.62	2.25	2.78	2.05
	Total con ISE-Dx	2.38	2.44	2.67	2.05
	Descontando ISE-Dx	2.45	2.44	2.73	2.15
	BR-Dy	1.94	2.49	2.03	2.17
	Total con ISE-Dy	1.55	2.55	2.10	2.21
	Descontando ISE-Dy	1.78	2.55	2.18	2.31

7.3.2 Cortantes de entrepiso normalizadas con el peso total de la estructura

Las gráficas que se muestran a continuación representan el valor del cortante de entrepiso normalizado respecto al peso total de la estructura en el último paso de carga cuando el primer disipador alcanza su ductilidad máxima ($\mu_d = 12$). En cada una de ellas, además del valor obtenido para el sistema global, se tiene la contribución por separado de columnas exteriores, columnas interiores y del sistema contraviento-disipador. Con esta información, se evalúa la contribución del balance de resistencia considerado en el diseño, entre los diferentes sistemas involucrados. En las figuras 7.15 y 7.16 se presentan los resultados obtenidos con el modelado de la base de los edificios como rígida, mientras que en las figuras 7.17 y 7.18, se presentan los resultados de los edificios modelando la base como flexible. Además, de éstas se aprecian, en el nivel de sótano, la contribución en resistencia de los muros del cajón de cimentación.

Para los modelos con base rígida (figuras 7.15 y 7.16), se aprecia de manera general que conforme mayor es el balance α utilizado, mayor es la contribución de las columnas conectadas al sistema contraviento-disipador (columnas exteriores). En ambas direcciones de análisis, se observa que sólo en el modelo más pequeño evaluado (figuras 7.15a y 7.16a), la contribución del sistema contraviento-disipador es mayor en comparación con el aporte de las columnas exteriores e interiores, con excepción del primer entrepiso. En la mayoría de los casos de los modelos con base rígida, la contribución en resistencia de las columnas interiores al sistema global es menor o muy similar al del sistema contraviento-disipador. Sin embargo, para el modelo más esbelto en la dirección y (figura 7.16c), la contribución del sistema contraviento-disipador es menor que las columnas interiores y exteriores en todos los entrepisos.

En el caso del modelado de la base de los edificios con interacción suelo-estructura (figuras 7.17 y 7.18), se observa en primera instancia que los valores de V/W , en el entrepiso cero, son menores cuando se considera su base como flexible en comparación a los de base rígida, aunque para el modelo de 24 entrepisos se presente lo contrario. Este comportamiento está estrechamente vinculado a la misma tendencia encontrada para los valores de sobrerresistencia (R), resumidos en la tabla 7.1. Aunque la forma del perfil de cortantes no es similar entre los edificios con variación de su base, se aprecia el mismo comportamiento comentado en el párrafo anterior. No obstante, se aprecia en todos los casos que la contribución de los muros perimetrales es mayor que el de las columnas exteriores o interiores, con excepción del modelo de 15 niveles en la dirección en y (figura 7.18b), donde el aporte de resistencia de las columnas exteriores es mayor o similar que el de los muros perimetrales. Además, el aporte de cortante de las columnas interiores en los niveles de sótano es casi nulo.

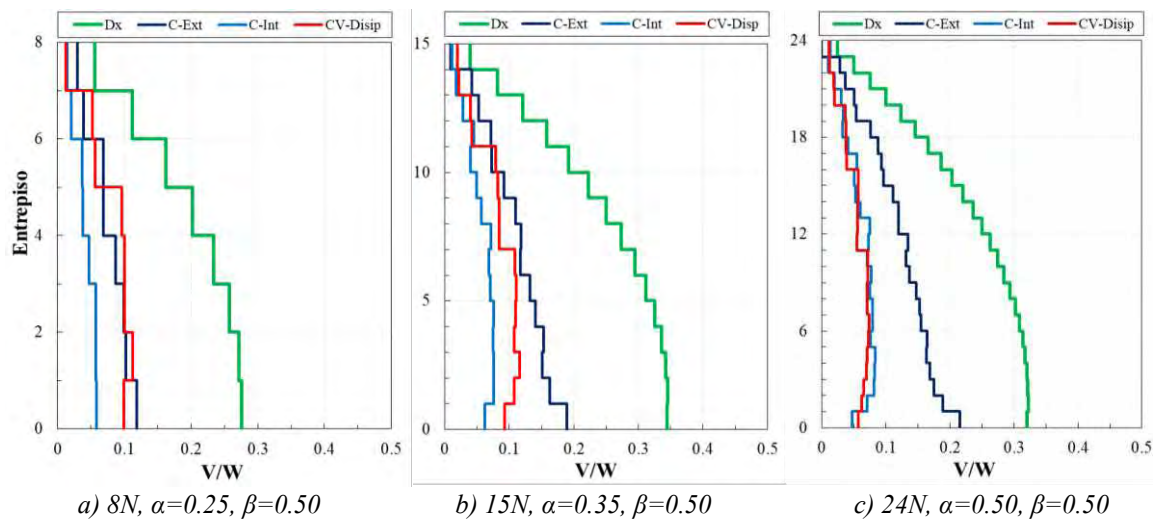


Figura 7.15. Cortantes de entrepiso en dirección x con base rígida

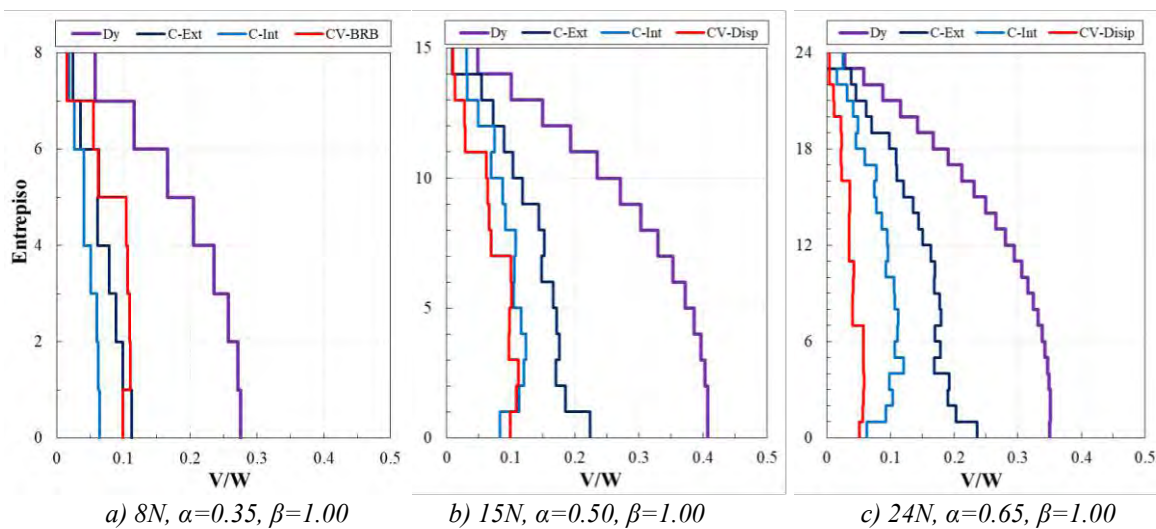


Figura 7.16. Cortantes de entrepiso en dirección y con base rígida

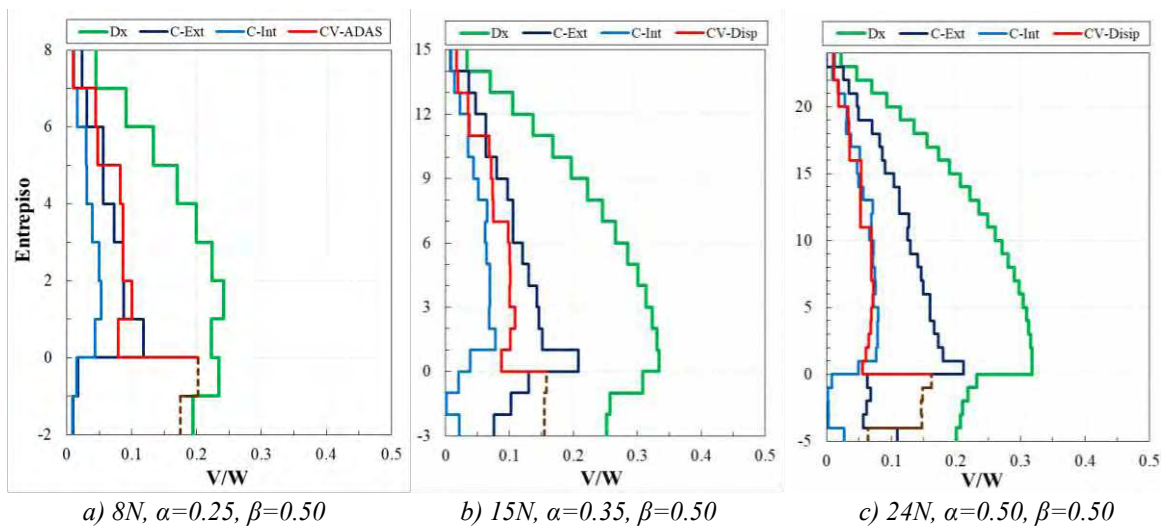


Figura 7.17. Cortantes de entrepiso en dirección x con base flexible

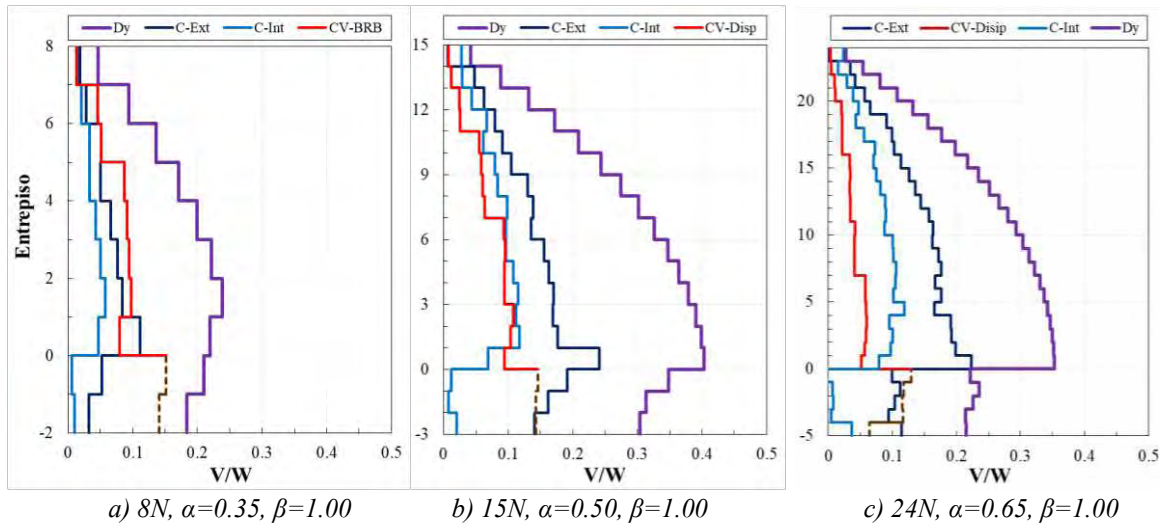



















Figura 7.18. Cortantes de entrepiso en dirección y con base flexible

7.3.3 Mapeos de fluencia inelástica

Los mapeos de fluencia inelástica, presentados en las figuras de esta sección, tienen un código de colores que simbolizan la magnitud de rotación a flexión para vigas y columnas; y en el caso de los disipadores de energía, dicho código de colores representan su ductilidad desarrollada. En la tabla 7.2 se presenta de manera ilustrativa la escala de colores asignada para los elementos de concreto. A diferencia de la utilizada en el capítulo tres, ésta se subdivide en nueve colores diferentes para representar el porcentaje de no linealidad que desarrollan los elementos del marco, en comparación con la rotación máxima que puede desarrollar cada uno de los elementos del marco (ecuación 3.1).

Tabla 7.2. Códigos de colores para fluencias inelásticas de modelos tridimensionales

	$0 \leq \theta (\%) < 0.05$		$1 \leq \mu_{ADAS} < 6$
	$0.05 \leq \theta (\%) < 0.1$		$6 \leq \mu_{ADAS} < 8$
	$0.1 \leq \theta (\%) < 0.15$		$8 \leq \mu_{ADAS} < 10$
	$0.15 \leq \theta (\%) < 0.2$		$10 \leq \mu_{ADAS} < 12$
	$0.2 \leq \theta (\%) < 0.3$		
	$0.3 \leq \theta (\%) < 0.45$		$1 \leq \mu_{BRB} < 4$
	$0.45 \leq \theta (\%) < 0.6$		$4 \leq \mu_{BRB} < 6$
	$0.6 \leq \theta (\%) < 0.8$		$6 \leq \mu_{BRB} < 8$
	$0.8 \leq \theta (\%) < 1$		$8 \leq \mu_{BRB} < 10$

Por lo tanto, el punto en color blanco, representa un punto a partir del cual el elemento empieza a incursionar en el intervalo inelástico hasta un 5% de su rotación máxima; un punto en color negro, representa una rotación cercana a la última que el elemento de concreto reforzado es capaz de soportar; los otros colores representan puntos intermedios entre el punto de fluencia y el punto último que soporta la sección. Para todos los casos, se asignó el color negro para cuando el elemento estructural está cercano a la articulación plástica. Por último, no se colocó ninguna representación gráfica cuando el elemento se comportaba de manera elástica; lo cual fue el caso para los contravientos de soporte en todos los modelos evaluados. En las figuras 7.19 a 7.26 se presentan los mapeos de fluencia inelástica de los resultados con el patrón de carga modal; éstas se separan para cada dirección de análisis, por el tipo de modelado de su base, y por cuestiones prácticas se muestran un marco perimetral y uno interior para las mismas condiciones antes mencionadas. En las figuras 7.27 a 7.34 se comparan los resultados entre la variación del patrón de carga (estática y modal), y se comentan las diferencias observadas de ésta.

Para el mapeo de fluencias de los edificios de ocho entrepisos (figuras 7.19 a 7.22), se observa de manera general un desempeño resiliente en el mecanismo de fluencias, es decir, la máxima participación no lineal se da en los disipadores de energía, las vigas presentan fluencia incipiente, mientras que las columnas y contravientos permanecen elásticos. Para los mapeos en la dirección en x (figuras 7.19 y 7.21), se observa que la fluencia incipiente en vigas es menor al 5% de la rotación última para cada sección usada, independientemente de la forma como se consideró la base en los modelos. Sin embargo, se observan cambios en el código de colores usado para representar la rotación de los elementos en la dirección y , dado que algunas vigas desarrollan mayor rotación que en la dirección x (menor al 10% de la rotación última); además, se observa que más entrepisos en la dirección y tienen vigas con participación no lineal, si se compara con la dirección ortogonal a ésta, donde vigas y columnas permanecen elásticas (figura 7.19 y 7.21). Finalmente, el mapeo de fluencias inelásticas que se obtuvieron considerando la base como flexible presenta pequeñas diferencias en la ductilidad que los disipadores desarrollan (figuras 7.21 y 7.22).

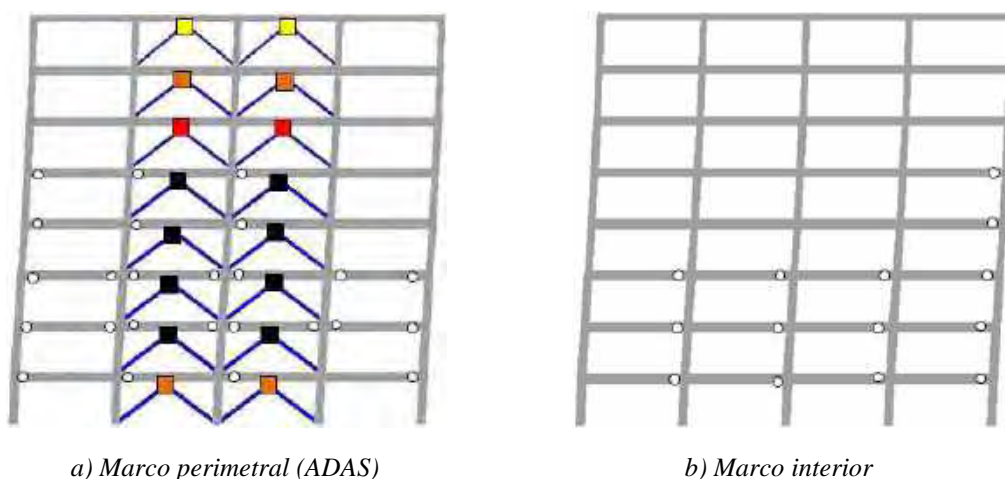
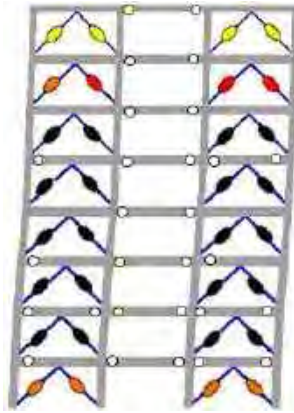


Figura 7.19. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 8 niveles con base rígida, dirección x

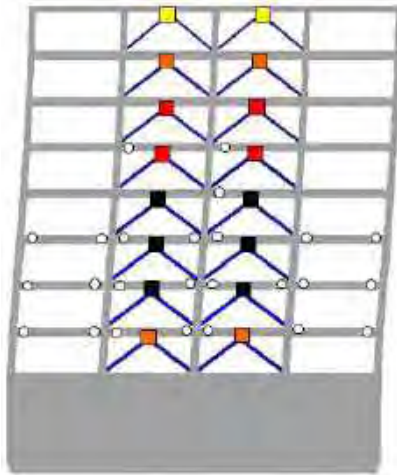


a) Marco perimetral (BRB)

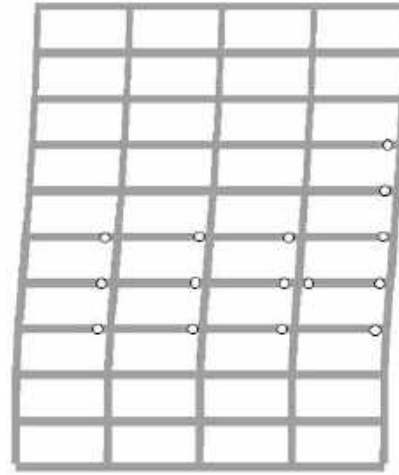


b) Marco interior

Figura 7.20. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 8 niveles con base rígida, dirección y

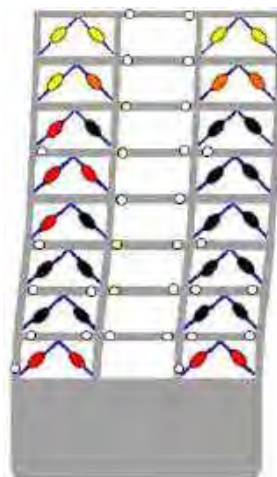


a) Marco perimetral (ADAS)



b) Marco interior

Figura 7.21. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 8 niveles con base flexible, dirección x



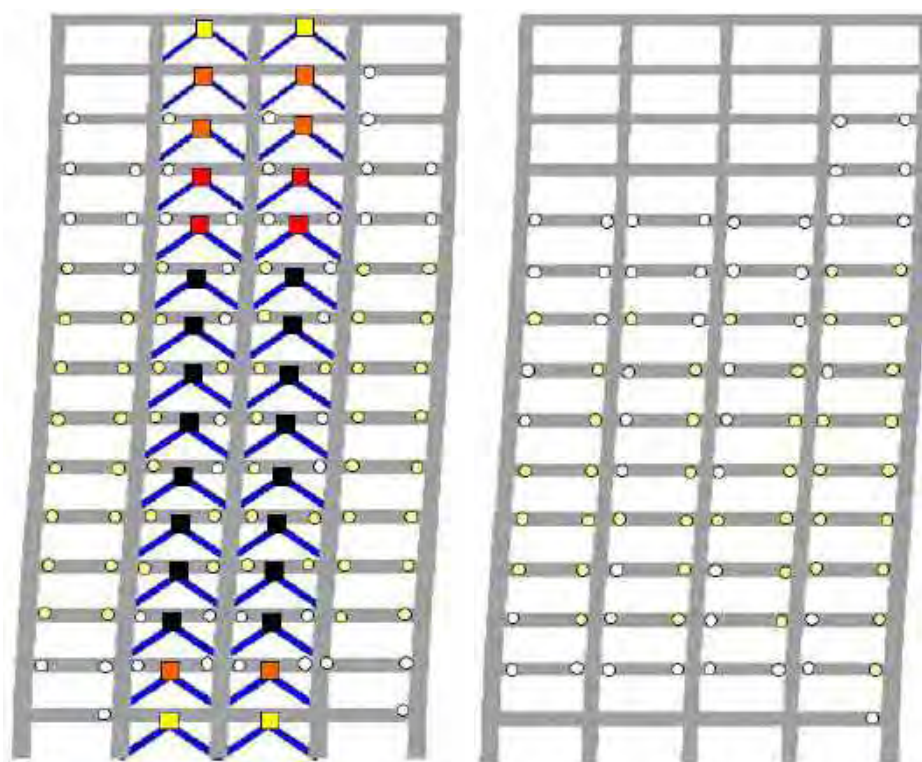
a) Marco perimetral (BRB)



b) Marco interior

Figura 7.22. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 8 niveles con base flexible, dirección y

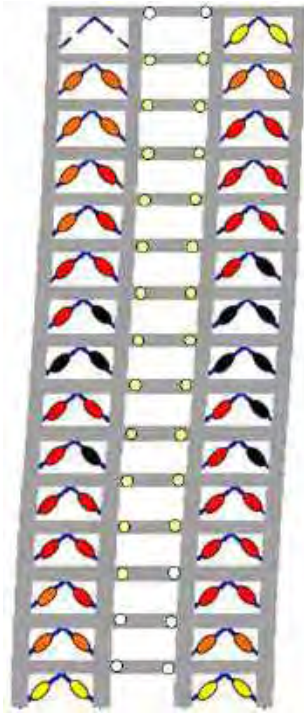
En los edificios de 15 entrepisos (figuras 7.23 a 7.26), también se observa un desempeño resiliente similar al de los edificios de ocho niveles, es decir, columnas y contravientos permanecen elásticos, las vigas presentan fluencias menores al 10% de la rotación última y la máxima participación no lineal se da en los disipadores de energía. En la dirección donde se usaron disipadores del tipo ADAS (figuras 7.23 y 7.25), se observa que cuando se modela al edificio como base rígida se alcanzan ductilidades de $\mu_{ADAS} > 10$ (figura 7.23), aunque cuando se toman en cuenta efectos de interacción suelo-estructura, la ductilidad que desarrollan los dispositivos ADAS disminuye, y se observa con el cambio del código de colores en la figura 7.25. Para la dirección y, donde se usaron dispositivos tipo BRB, se observa que el 65% del total de dispositivos desarrollan ductilidades $\mu_{BRB} > 6$ (figuras 7.24 y 7.26), aunque cuando se modela la base como flexible, se observa que más BRBs desarrollan ductilidades $\mu_{BRB} > 8$ (código de color negro). Sin embargo, se observa que para el primer y último entrepiso, los dispositivos de disipación de energía desarrollan las menores ductilidades (código de color amarillo), independientemente de la dirección de análisis y de la forma de modelar la base de los edificios. No obstante, se observa que un par de BRBs de la azotea permanecen elásticos, sin importar si se toma o no en cuenta efectos de interacción suelo – estructura. Para el caso donde se modelan los elementos del cajón de cimentación, se observa que todos los elementos estructurales por debajo del nivel cero del terreno permanecen elásticos tanto en los marcos exteriores como en los interiores.



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

Figura 7.23. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 15 niveles con base rígida, dirección x

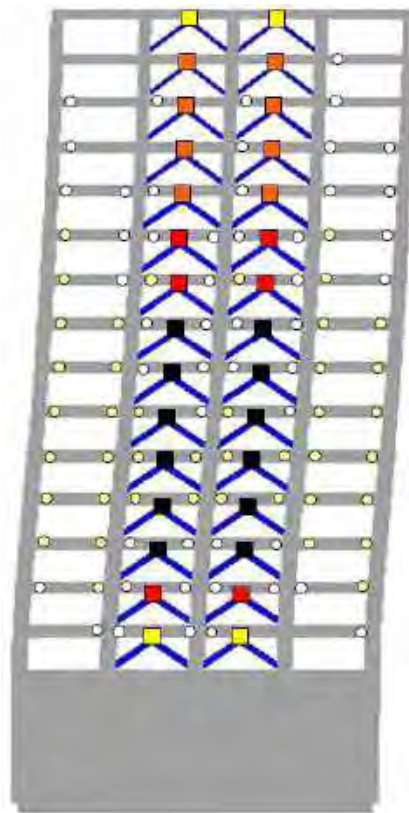


a) Marco perimetral (BRB)



b) Marco interior

Figura 7.24. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 15 niveles con base rígida, dirección y

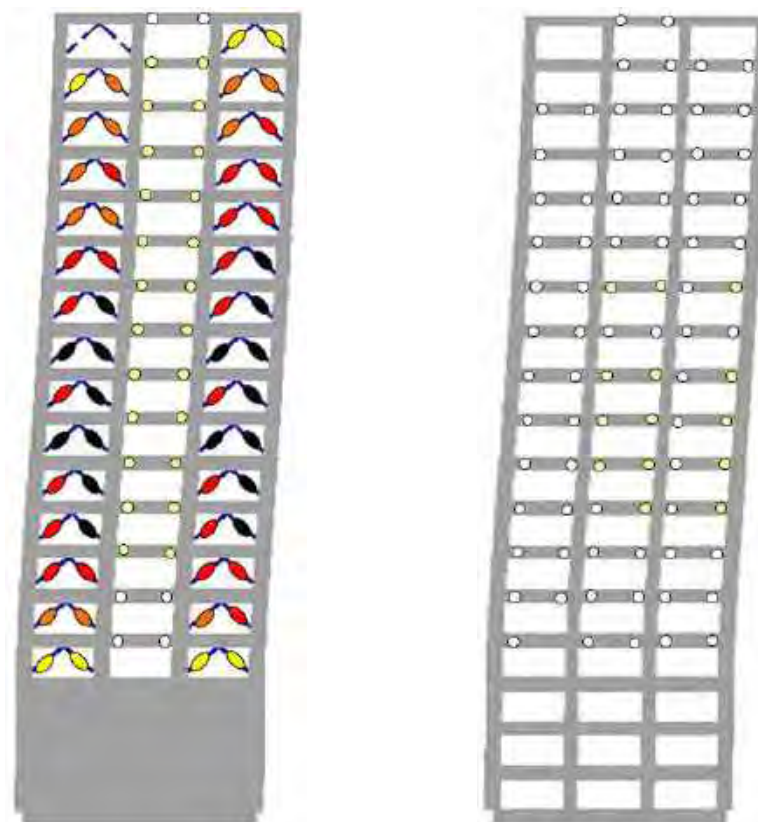


a) Marco perimetral (ADAS)



b) Marco interior

Figura 7.25. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 15 niveles con base flexible, dirección x



a) Marco perimetral (BRB)

b) Marco interior

Figura 7.26. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 15 niveles con base flexible, dirección y

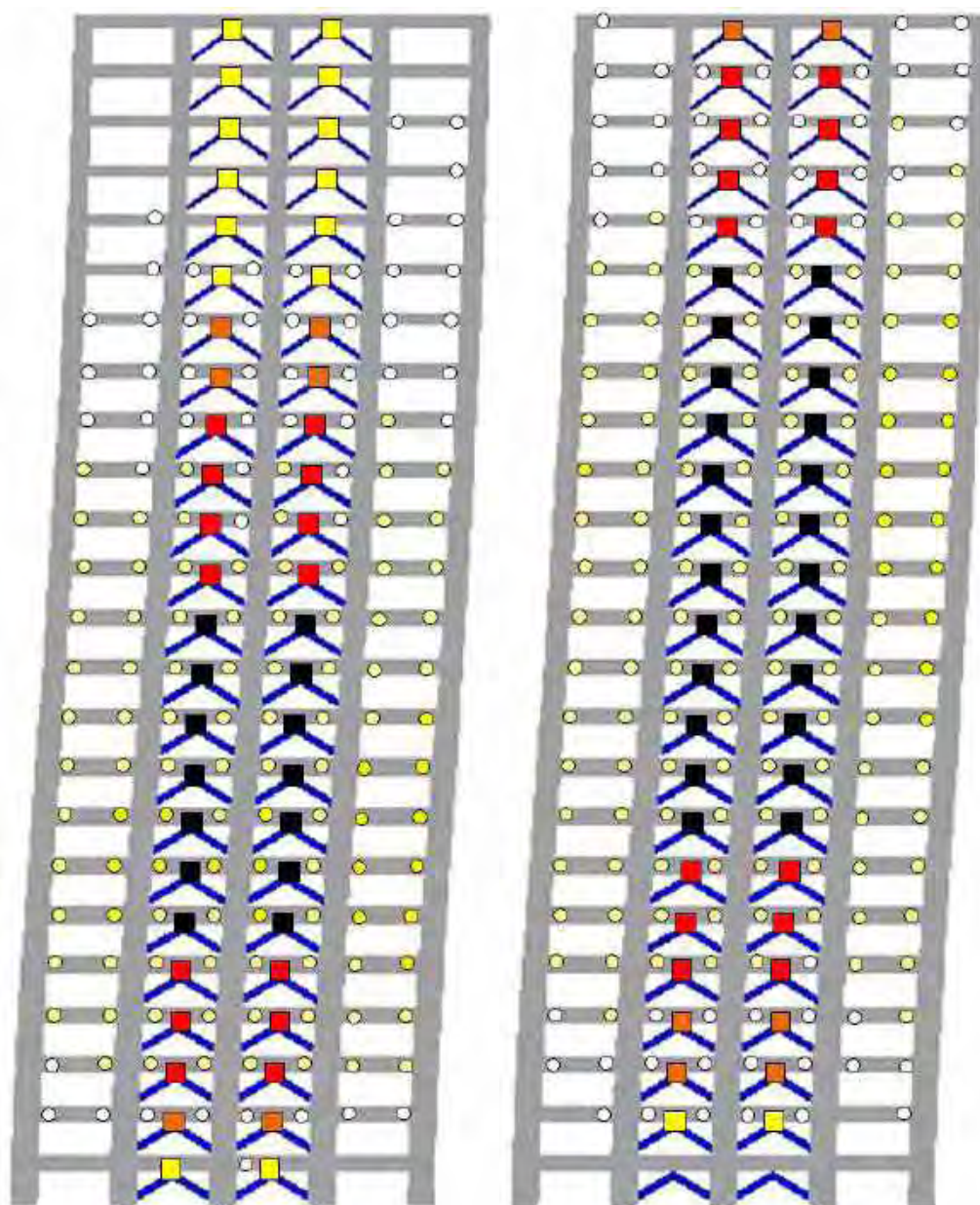
En las figuras 7.27 a 7.34 se presentan los mapeos de fluencia de los edificios de 24 entresijos. En éstas, se comparan directamente las diferencias encontradas con la variación del patrón de carga. En primera instancia, se compara el comportamiento no lineal de los disipadores de energía con las diferentes variaciones entre los modelos. En las tablas 7.3 y 7.4 se resumen la cantidad de disipadores que desarrollan cierto intervalo de ductilidad en términos de porcentaje. Se observa de éstas, que casi la mitad de dispositivos tipo ADAS alcanzan una ductilidad cercana a la falla (código negro); sobre todo cuando se utiliza un patrón de carga modal (tabla 7.3). En contraste, aproximadamente el 25% del total de dispositivos BRBs desarrollan una ductilidad cercana a la falla con el patrón de carga modal, y dicha cantidad se reduce con el patrón de carga estática (tabla 7.4).

Tabla 7.3. Cantidad de dispositivos ADAS con participación no lineal, modelo 24N

Modelos de 24N		Patrón de carga estática		Patrón de carga modal	
		BR	ISE	BR	ISE
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: orange; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: red; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: black;"></div> </div>	Elástico	0.0%	0.0%	4.2%	0.0%
	$1 \leq \mu_{\text{ADAS}} < 6$	29.2%	41.7%	4.2%	10.4%
	$6 \leq \mu_{\text{ADAS}} < 8$	12.5%	16.7%	12.5%	16.7%
	$8 \leq \mu_{\text{ADAS}} < 10$	29.2%	10.4%	29.2%	27.1%
	$10 \leq \mu_{\text{ADAS}} < 12$	29.2%	31.3%	50.0%	45.8%

Tabla 7.4. Cantidad de dispositivos BRB con participación no lineal, modelo 24N

Modelos de 24N		Patrón de carga estática		Patrón de carga modal	
		BR	ISE	BR	ISE
	Elástico	6.3%	11.5%	0.0%	2.0%
	$1 \leq \mu_{BRB} < 4$	19.8%	35.4%	18.8%	8.2%
	$4 \leq \mu_{BRB} < 6$	24.0%	28.1%	31.3%	19.4%
	$6 \leq \mu_{BRB} < 8$	32.3%	16.7%	24.0%	45.9%
	$8 \leq \mu_{BRB} < 10$	17.7%	8.3%	26.0%	24.5%

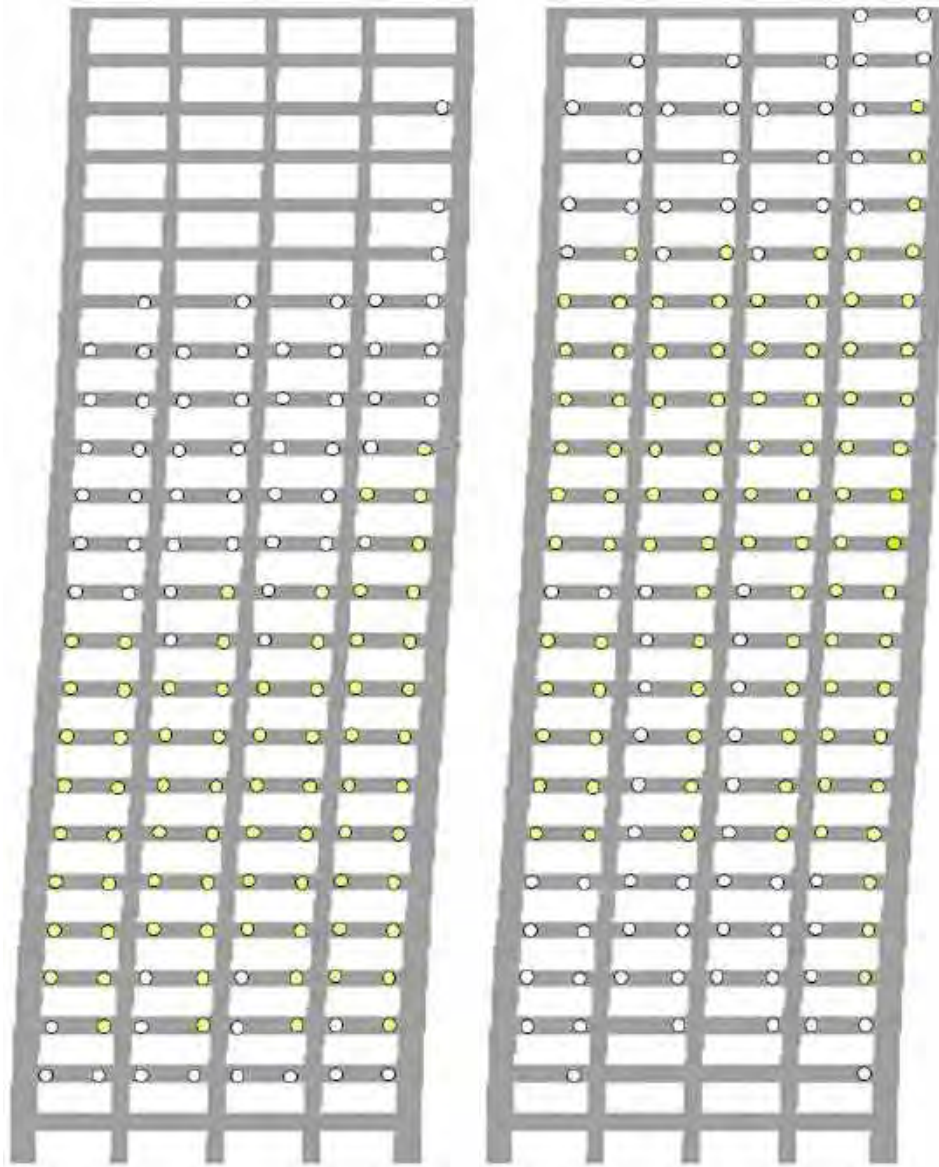


a) Patrón de carga estático

b) Patrón de carga modal

Figura 7.27. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 24 niveles con base rígida, marco perimetral en x

Para los modelos con base rígida en dirección x (figuras 7.27 y 7.28), se observa que las columnas y contravientos permanecen elásticos. Además, las vigas desarrollan una rotación máxima menor al 15% de la rotación última esperada. Esas magnitudes de rotaciones se presentan en los entrepisos de los marcos perimetrales, donde los dispositivos ADAS desarrollan sus máximas ductilidades (figura 7.27). Las magnitudes de rotación para los marcos interiores son aún menores, y se aprecia por el código de colores que se presentan en la figura 7.28.



a) Patrón de carga estático

b) Patrón de carga modal

Figura 7.28. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 24 niveles con base rígida, marco interior en x

Para los modelos con base rígida en dirección y (figuras 7.29 y 7.30), se observa que sólo los contravientos de soporte permanecen elásticos con ambas condiciones de patrón de carga evaluadas. Para el patrón de carga estática, se observan fluencias incipientes (menores al 5% de la rotación última) en columnas de la periferia izquierda en el primer cuarto de la altura total del edificio (figura 7.29a). No obstante, estas fluencias no se desarrollan cuando se usa un patrón de carga modal (figura 7.29b). Sin embargo, las vigas de los marcos perimetrales, desarrollan mayores magnitudes de rotación con el patrón de carga modal (cercanas al 20% de la rotación última esperada). Para el caso de los marcos interiores, la participación no lineal de sus elementos es menor, en comparación con el de los marcos exteriores“; a pesar de que se presentan códigos de color amarillo, éstos solo están en un tercio del total de entresijos (figura 7.30).

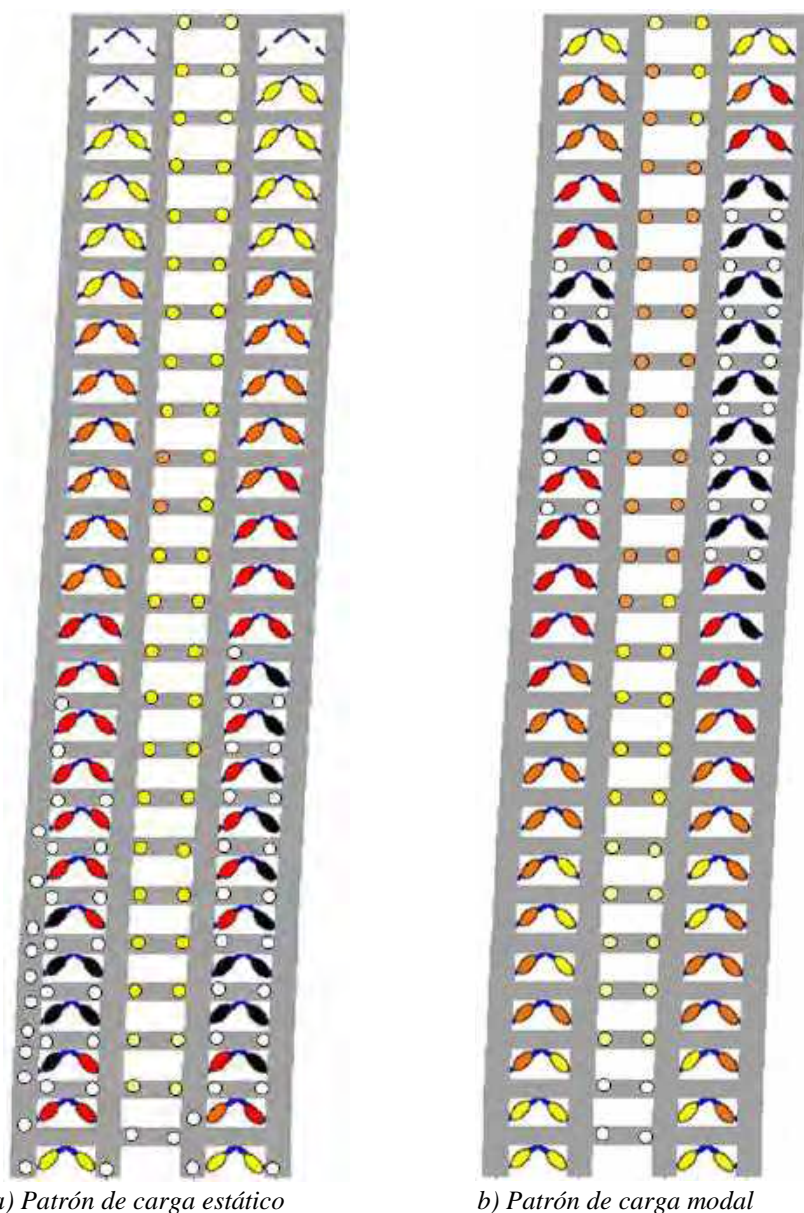
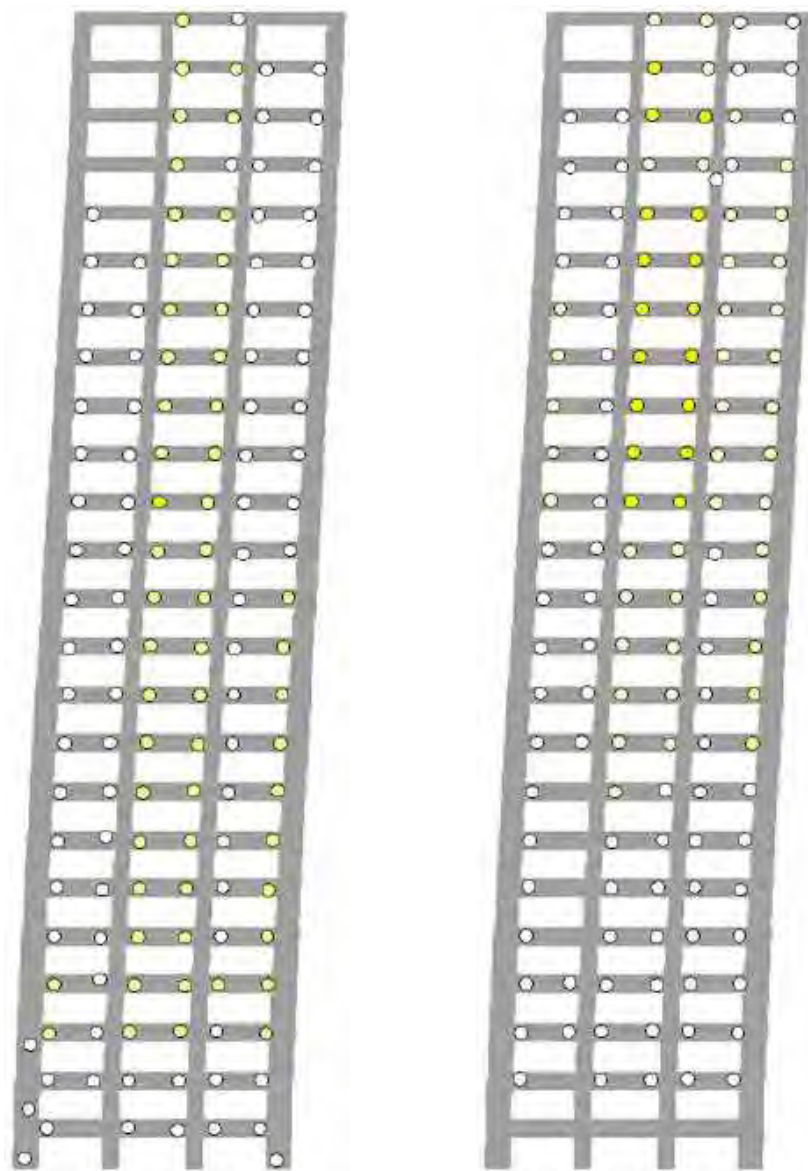


Figura 7.29. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 24 niveles con base rígida, marco perimetral en y



a) Patrón de carga estático

b) Patrón de carga modal

Figura 7.30. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 24 niveles con base rígida, marco interior en y

Evaluando los modelos con base flexible, se observa que en todos los casos, los elementos de los niveles de sótanos permanecen elásticos (figuras 7.31 a 7.34). Se aprecia también que con el uso del patrón de carga modal, más del 70% del total de dispositivos de disipación desarrollan ductilidades cercanas a la última, es decir, se presentan códigos de colores rojos y negros para los disipadores ADAS (figura 7.31b) y para los dispositivos BRB (figura 7.33b). Se ha visto en los otros modelos evaluados que usar la interacción suelo-estructura flexibiliza a la estructura y sus elementos desarrollan mayores magnitudes de rotación, para el caso en la dirección x (figuras 7.31 y 7.32), el código de colores no varía en comparación con el modelado con base rígida, y dichas rotaciones siguen siendo menores al 15%. Por el contrario, en la dirección y las rotaciones de las vigas en los marcos perimetrales se

amplifican con el modelado de su base como flexible, y éstas pueden estar cercanas al 30% de su rotación última (figura 7.33b). Aunque para todos los casos con base flexible se presentan rotaciones en algunas columnas de los modelos de 24 niveles, éstas son menores al 5% de su máxima rotación, y se desarrollan en mayor cantidad de columnas en la dirección y con cualquier patrón de carga (figura 7.34).

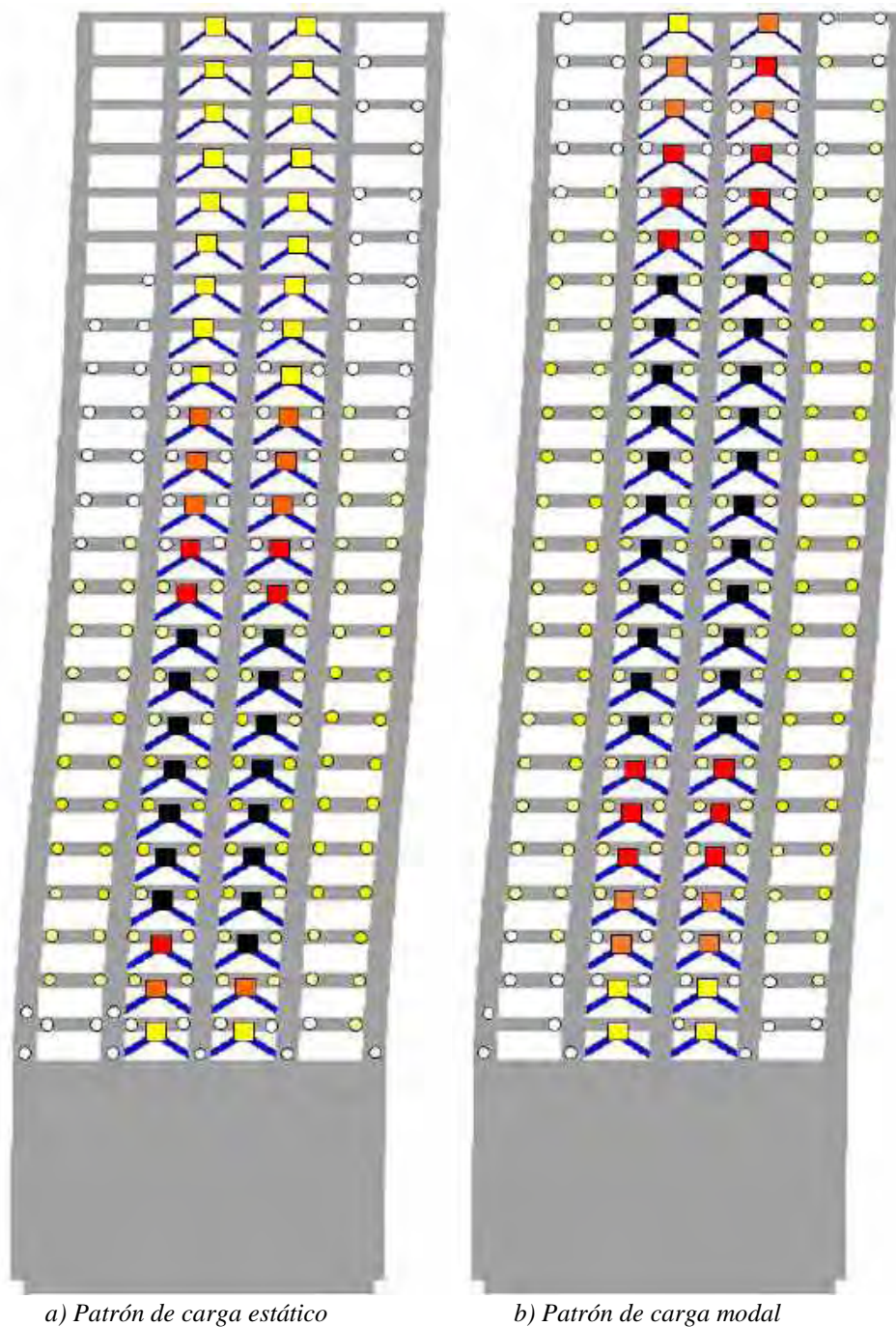
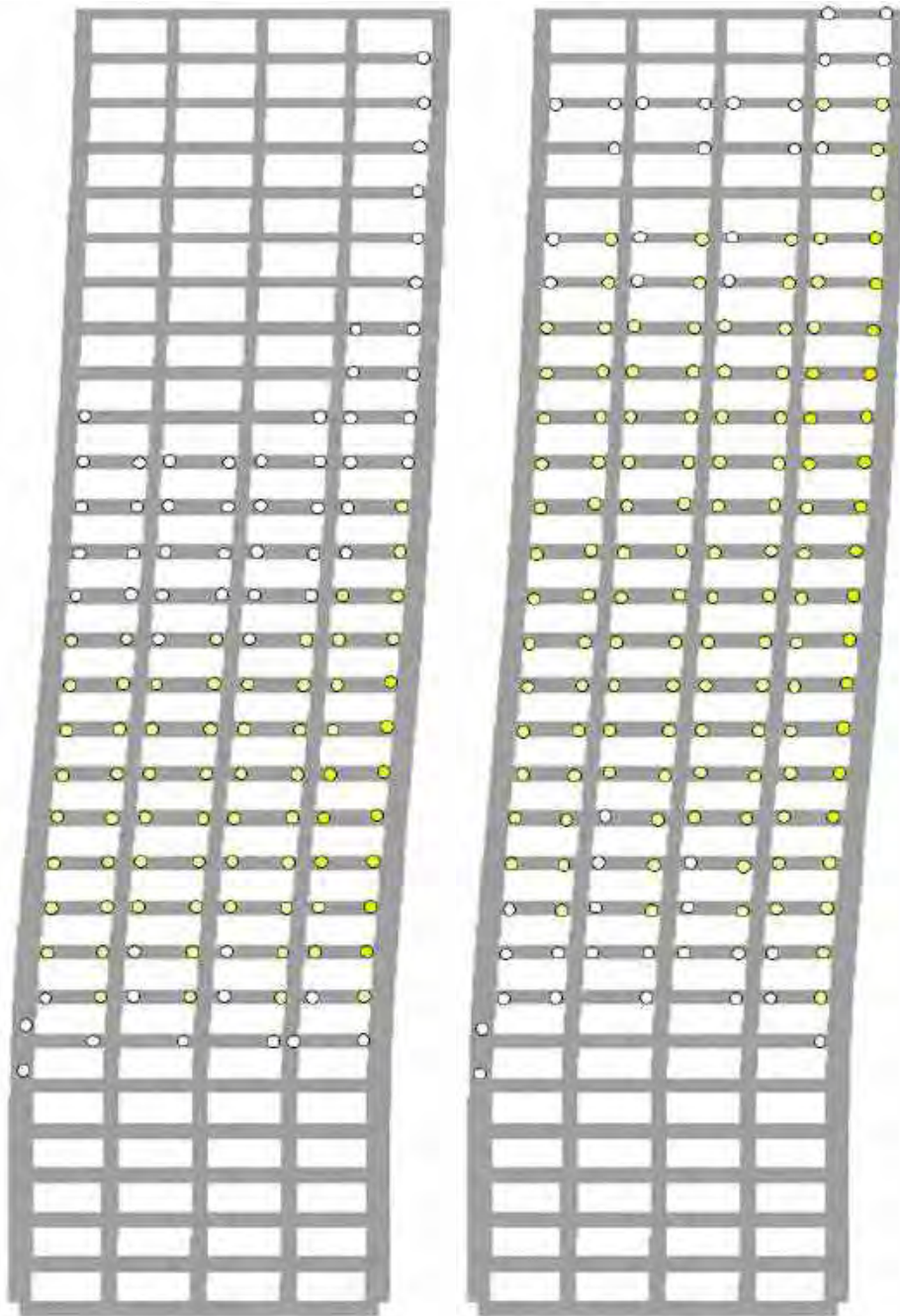


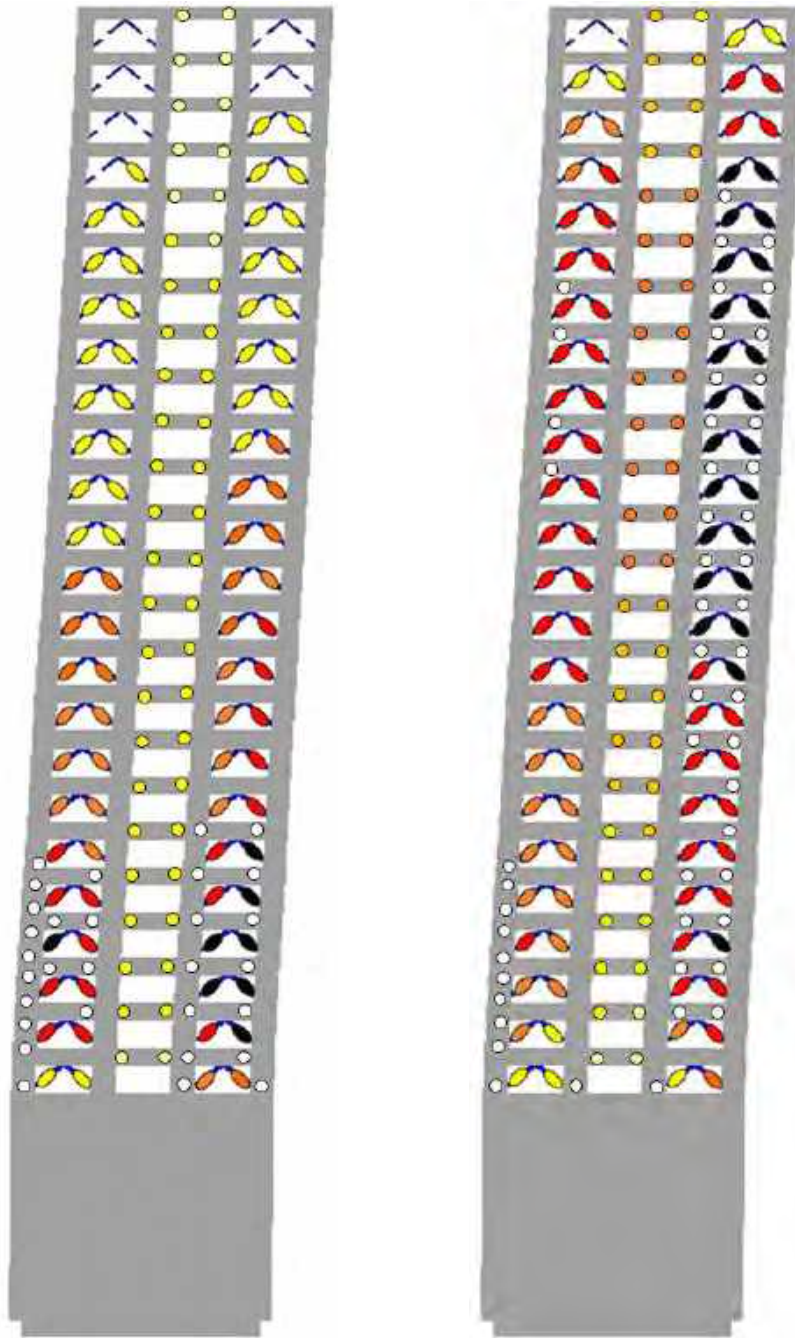
Figura 7.31. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 24 niveles con base flexible, marco perimetral en x



a) Patrón de carga estático

b) Patrón de carga modal

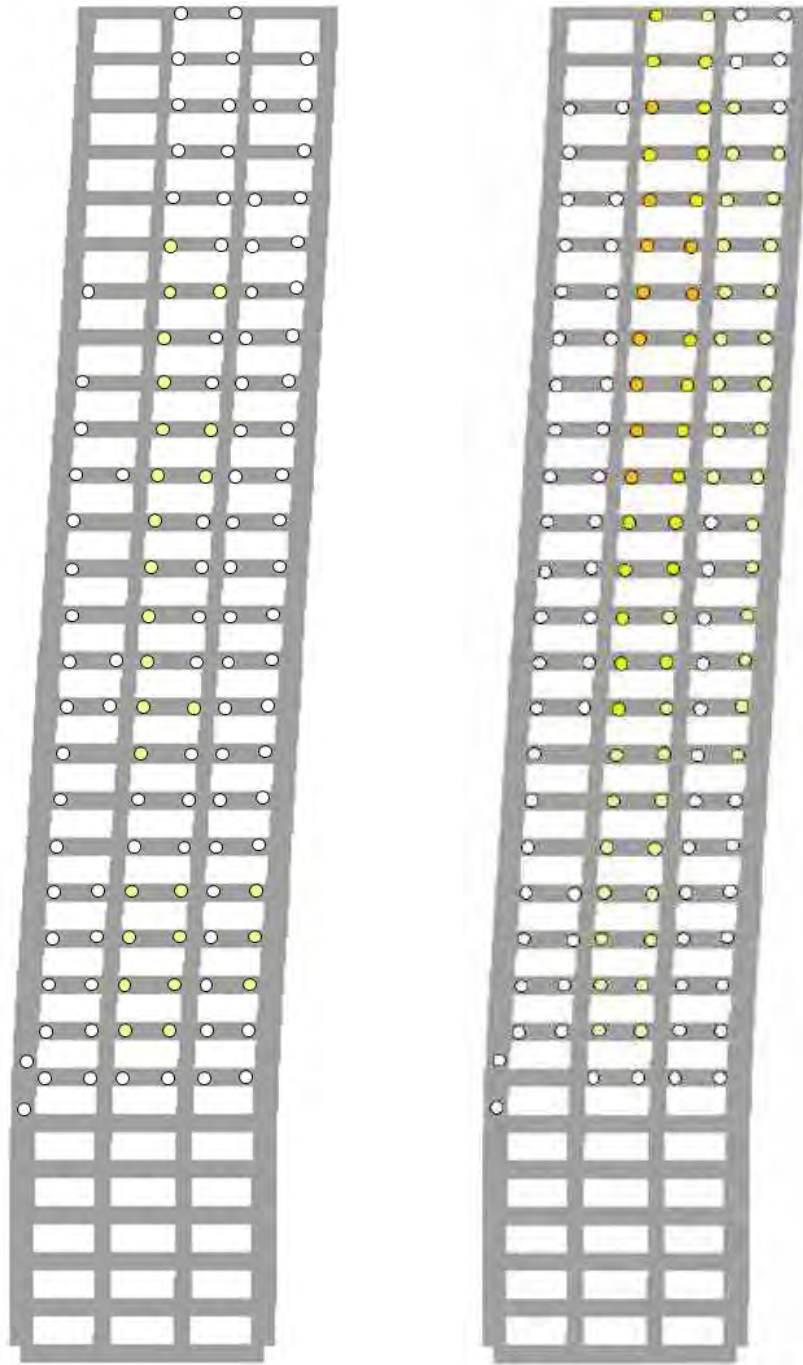
Figura 7.32. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 24 niveles con base flexible, marco interior en x



a) Patrón de carga estático

b) Patrón de carga modal

Figura 7.33. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 24 niveles con base flexible, marco perimetral en y



a) Patrón de carga estático

b) Patrón de carga modal

Figura 7.34. Mapeo de fluencia inelástica, modelo de 24 niveles con base flexible, marco interior en y

7.4 Comentarios generales

En este capítulo se evaluó el comportamiento de los edificios tridimensionales, diseñados en el capítulo seis, a partir de los resultados obtenidos de análisis estáticos no lineales, con dos diferentes patrones de carga. De manera general se observó un comportamiento estructural resiliente para todos los modelos con relación de esbeltez $H/L < 4.0$, es decir, la mayor participación no lineal se concentró en los dispositivos ADAS y BRBs, con fluencias incipientes en vigas, mientras que las columnas y los contravientos permanecieron elásticos. El tomar en cuenta en el modelado los efectos de interacción suelo-estructura, tiene como consecuencia que más dispositivos de disipación desarrollen una ductilidad cercana a la última, aunque provoca que la rotación de las vigas aumente también. La diferencia de resultados, con la variación del patrón de carga inducido a los edificios, se hace más notable conforme más flexible sean éstos. Por tal motivo, se presenta la comparativa para los modelos con 24 entresijos, donde se observa que el usar un patrón de carga modal hace que las columnas en la dirección x permanezcan elásticas. No obstante, se presentan magnitudes de máximas de rotaciones cercanas a un 30% de la última para la dirección y y cuando se considera su base como flexible.

Los valores de ductilidad global desarrollados por los modelos tridimensionales fueron menores que los desarrollados para los marcos planos (evaluados en el capítulo cuatro). Esto era de esperarse debido a que en el proceso de diseño para los edificios, se limitó la distorsión máxima permisible bajo condiciones últimas y de servicio (capítulo seis). Además, el modelado de las zonas rígidas en tres dimensiones contribuye a que se reduzca la ductilidad que desarrollan los modelos tridimensionales en comparación a los marcos planos (capítulo cinco), y esta diferencia se va acrecentando conforme el modelo aumenta su relación de esbeltez. Con excepción de la dirección x para el modelo de ocho entresijos, todos los modelos desarrollaron una ductilidad global entre $2.0 < Q < 4.0$ (figura 7.35).

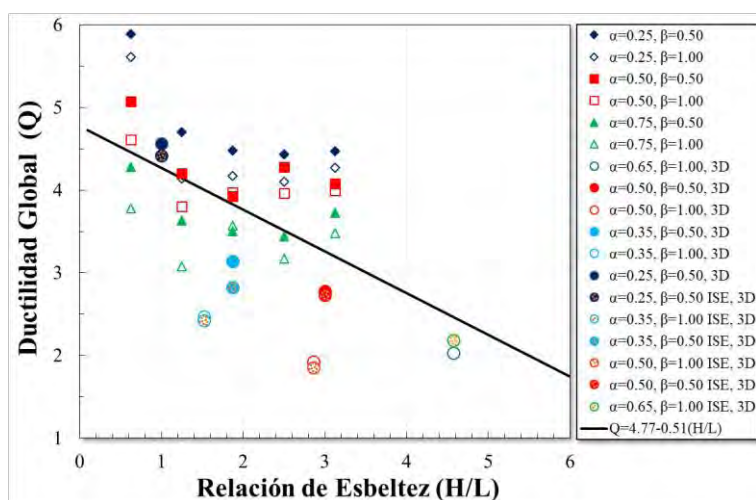


Figura 7.35. Comparativa de factor de reducción por ductilidad, Q con modelos tridimensionales

Finalmente, los valores de sobrerresistencia obtenidos para los edificios evaluados en esta sección, fueron mayores a los supuestos en el proceso de diseño ($R \approx 1.5$). A diferencia de los dispositivos de disipación usados para los marcos planos, donde se usaron disipadores genéricos (capítulo cuatro), en los modelos tridimensionales se diseñaron dispositivos ADAS y BRBs. En otras palabras, la principal diferencia es que en el diseño de los edificios tridimensionales, se propusieron cantidad y espesores de placas para los disipadores lo que contribuyó en el aumento del valor del parámetro R . Se aprecia de la figura 7.36 que los valores de la sobrerresistencia se encuentran en un intervalo entre $1.9 < R < 2.4$; además, las diferencias en el modelado de la base de los edificios hacen que el valor de R sea menor cuando se toman en cuenta los efectos de interacción-suelo estructura para relaciones de esbeltez $H/L < 3.0$.

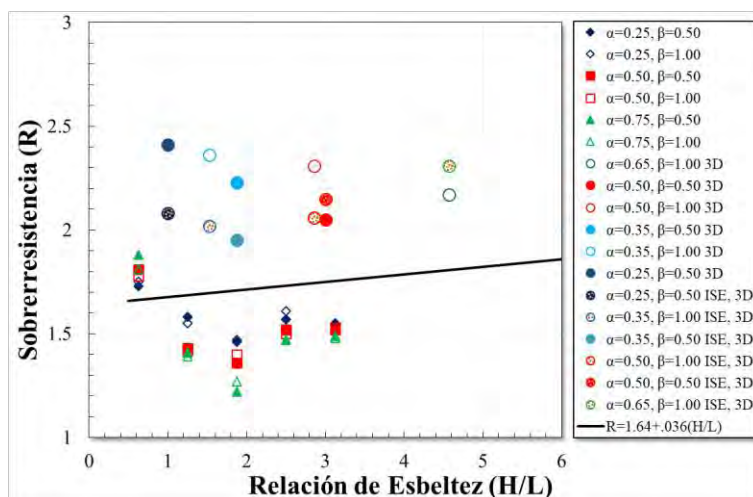


Figura 7.36. Comparativa de factor de reducción por sobrerresistencia, R con modelos tridimensionales

Con los resultados obtenidos de los análisis estáticos no lineales, se tiene una idea del comportamiento general de la estructura, así como del comportamiento particular de cada elemento estructural. Aunque todos los modelos presentan un comportamiento modal asociado a la traslación, en su periodo de vibrar fundamental (tabla 6.36), en el siguiente capítulo se evaluará el comportamiento de los edificios bajo registros de aceleración representativos de la zona para donde se diseñaron. Con el objetivo de evaluar de manera minuciosa y detallada las implicaciones de la redistribución de elementos mecánicos cuando se toma en cuenta la degradación de rigidez en los elementos de concreto cuando participan de manera no lineal.

8. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS MODELOS TRIDIMENSIONALES CON BASE EN ANÁLISIS DINÁMICOS NO LINEALES PASO A PASO

8.1 Introducción

En este capítulo se evalúa el comportamiento sísmico de los diseños de los modelos del capítulo anterior, obtenidos a partir de los resultados de análisis dinámicos no lineales paso a paso. En primera instancia, se presentan las consideraciones tomadas en cuenta para este tipo de análisis. Posteriormente, se comentan los resultados obtenidos a partir de una serie de registros de aceleración (sintéticos y reales), representativos de cada zona donde estarían desplantados los edificios. Dichos resultados se presentan de forma gráfica para evaluar los siguientes parámetros:

- a) Curvas de histéresis de los disipadores de energía ADAS y BRBs
- b) Curvas de histéresis de entrepiso y globales
- c) Mapeo de fluencias inelásticas
- d) Distorsiones de entrepiso asociadas a la primera fluencia del disipador de energía (Δ_y)
- e) Envoltentes de distorsiones máximas por entrepiso (Δ_{ux})
- f) Demandas máximas de ductilidad por entrepiso y globales
- g) Sobrerresistencia máxima asociada a los registros de aceleración
- h) Cortantes de entrepiso normalizadas con el peso total de la estructura
- i) Porcentaje de ciclos inelásticos con respecto al número total de ciclos demandados por los movimientos del terreno
- j) Cociente de la rigidez secante mínima de entrepiso asociada a medios ciclos histeréticos inelásticos (K_{min}) con respecto a la rigidez elástica de entrepiso (K_{el})
- k) Cociente de la rigidez secante de entrepiso promedio asociada a medios ciclos histeréticos inelásticos (K_{prom}) con respecto a la rigidez elástica de entrepiso (K_{el})
- l) Distorsiones residuales (d_r)
- m) Relación de distorsiones residuales ($d_r / d_{r,max}$)
- n) Relación de distorsiones residuales máximas (d_r / d_{max})

8.2 Consideraciones generales

Los análisis dinámicos no lineales paso a paso se efectuaron con el programa MIDAS Gen (MIDAS 2017), utilizando los modelos tridimensionales del capítulo seis que toman en cuenta la zona rígida del nodo viga-columna en tres dimensiones. El comportamiento histerético de vigas y columnas se definió con el modelo de Takeda modificado, considerando la posible formación de fluencias inelásticas en sus extremos. Se tomó en cuenta dicho modelo, porque considera la degradación de rigidez de los elementos de concreto reforzado. Los parámetros que definen dicha degradación difieren para el caso de vigas y columnas (Apéndice D), debido a que el confinamiento del núcleo de concreto en columnas es mucho mayor que el de vigas en todos los casos del presente trabajo (tablas 6.27

a 6.29). Para los elementos de contraventeo, se utilizó un modelo histerético llamado “*Steel Buckling*” de MIDAS Gen (2017) por las razones explicadas con anterioridad, y que se describe en el Apéndice D. Aunque los contravientos se diseñaron para que se comporten de manera elástica (sección 6.6.5), se tomaron en cuenta las propiedades no lineales para estos elementos, con el objetivo de monitorear su comportamiento inducido por las excitaciones sísmicas.

En los análisis no lineales realizados en esta sección, se consideró un amortiguamiento viscoso equivalente del 5%, en congruencia con lo supuesto en la definición de los espectros de diseño por la NTCS-04. Además, se compara el comportamiento no lineal de los edificios en estudio, considerando su base como rígida y modelando la interacción suelo-estructura. Sin embargo, no se consideró la participación no lineal de los elementos liga que representaban la rigidez y el amortiguamiento del suelo.

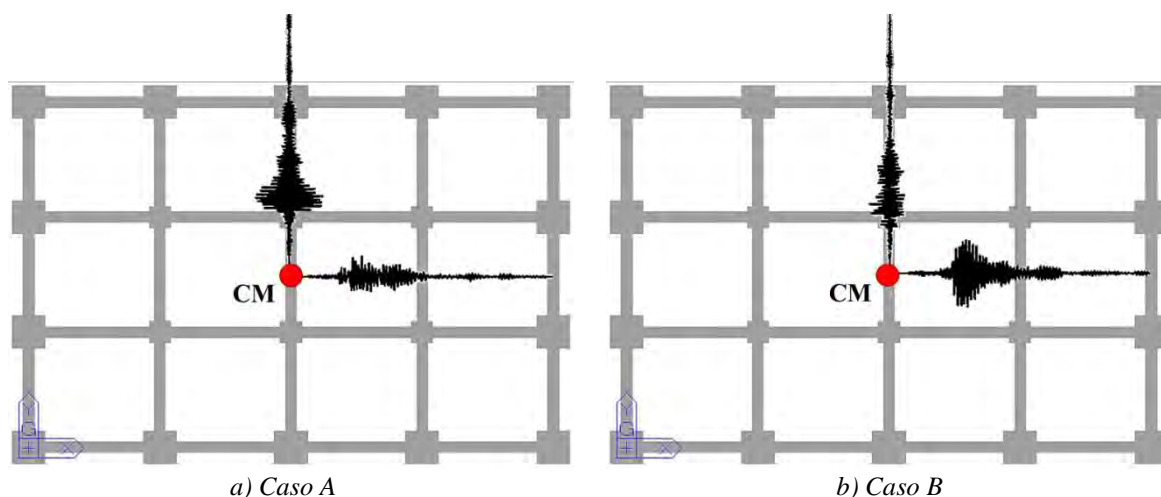


Figura 8.1. Dirección inducida de los registros de aceleración a los modelos tridimensionales

Para cada modelo evaluado se consideraron ocho pares de registros de aceleración, con la finalidad de calcular los valores promedio para cada edificio en particular. Cada uno de estos registros son representativos de la zona para la cual fueron diseñados, es decir, son característicos para el sismo máximo probable contemplados por la NTCS-04 (Apéndice E). Los registros se obtuvieron de diferentes fuentes, por lo que la base de datos cuenta con registros de los sismos de mayor magnitud acontecidos en CDMX (septiembre de 1985 y de 2017), y registros generados de manera sintética (Godínez 2005, Pérez Rocha 1994). Antes de utilizarlos en los análisis no lineales, éstos se corrigieron por línea base y con un filtrado pasa-banda delimitados entre 0.1 Hz a 10 Hz. Además, para todos los modelos se intercalaron las direcciones en las que actuaba el registro de aceleración, es decir, las direcciones EW y NS de cada registro se utilizaron en la dirección x y y en cada modelo de manera simultánea (figura 8.1). En las tablas 8.1 a 8.3 se resumen para cada dirección el nombre del registro, la aceleración máxima, la pseudo-aceleración máxima y el periodo donde ésta se presenta. Además, para identificar los registros sintéticos de los reales, éstos últimos se encierran entre paréntesis el año en el que se registró el evento. Asimismo, se aprecia que para algunos casos,

se utilizó un factor de escalado en los registros, para hacer coincidir su pseudo-aceleración máxima con el valor de la meseta del espectro elástico para la zona donde se diseñaron los modelos. De la misma manera, en las figuras 8.2 a 8.4 se presentan los espectros de pseudo-aceleración de cada registro utilizado en cada dirección, con el objetivo de compararlo con el espectro elástico de cada modelo en estudio, y de esta manera demostrar que cada registro utilizado es representativo de la zona donde se diseñó.

Tabla 8.1. Aceleraciones máximas de los acelerogramas, modelo de 8 entrepisos en zona de transición

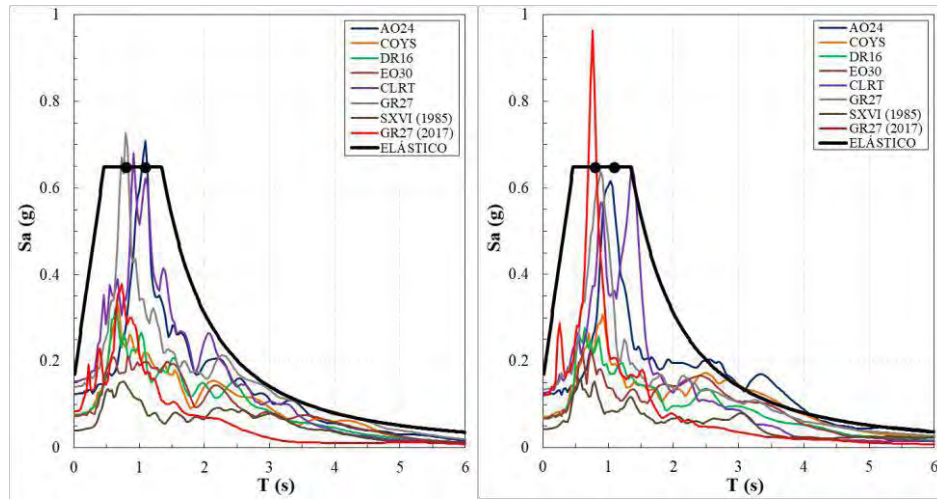
Clave	Factor de escalado	Dirección E-W			Dirección N-S		
		Aceleración Máxima (g)	Pseudo-aceleración máxima (g)	Periodo T (s)	Aceleración Máxima (g)	Pseudo-aceleración máxima (g)	Periodo T (s)
AO24	-	0.125	0.71	1.09	0.121	0.62	1.03
CLRT	-	0.135	0.69	1.36	0.154	0.68	0.91
COYS	1.96	0.077	0.33	0.67	0.071	0.31	0.91
DR16	2.00	0.075	0.32	0.64	0.068	0.28	0.64
EO30	2.93	0.074	0.21	0.82	0.067	0.22	0.73
GR27	-	0.142	0.73	0.79	0.135	0.64	0.88
SXVI (1985)	4.02	0.041	0.15	0.76	0.040	0.16	0.58
GR27 (2017)	-	0.084	0.38	0.73	0.121	0.96	0.76

Tabla 8.2. Aceleraciones máximas de los acelerogramas para modelo de 15 entrepisos en zona IIIa

Clave	Factor de escalado	Dirección E-W			Dirección N-S		
		Aceleración Máxima (g)	Pseudo-aceleración máxima (g)	Periodo T (s)	Aceleración Máxima (g)	Pseudo-aceleración máxima (g)	Periodo T (s)
MI15	1.08	0.185	1.02	1.27	0.187	1.01	1.42
CM	1.05	0.204	1.00	1.12	0.233	1.02	1.00
DFRO	-	0.182	1.01	1.27	0.196	0.95	1.42
SMR	1.09	0.184	1.02	1.24	0.115	0.63	1.33
IMSR	1.46	0.136	1.02	1.36	0.155	1.00	0.91
CU80 (2017)	-	0.146	0.84	1.18	0.171	0.86	1.24
DX37 (2017)	-	0.189	1.03	1.09	0.125	0.71	1.03
JC54 (2017)	-	0.222	0.81	1.18	0.206	1.05	1.27

Tabla 8.3. Aceleraciones máximas de los acelerogramas para modelo de 24 entrepisos en zona IIIb

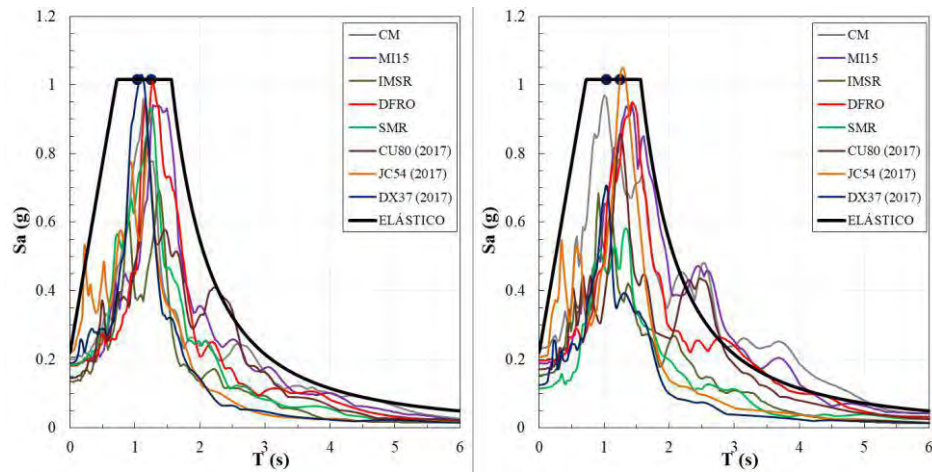
Clave	Factor de escalado	Dirección E-W			Dirección N-S		
		Aceleración Máxima (g)	Pseudo-aceleración máxima (g)	Periodo T (s)	Aceleración Máxima (g)	Pseudo-aceleración máxima (g)	Periodo T (s)
TL08	1.04	0.193	1.20	2.18	0.214	1.14	2.00
CJ03	-	0.275	1.17	2.12	0.241	1.20	1.91
ALAM85	1.29	0.170	1.20	2.12	0.146	0.79	1.76
TBOM (1985)	1.63	0.107	0.71	2.03	0.136	1.20	1.94
SCT185 (1985)	1.1	0.168	1.20	2.03	0.099	0.79	2.06
CH84 (2017)	-	0.141	0.61	1.36	0.228	1.57	1.39
MI15 (2017)	-	0.211	1.15	1.48	0.135	0.57	1.61
XO36 (2017)	-	0.126	0.48	1.55	0.177	0.84	1.58



a) Dirección EW

b) Dirección NS

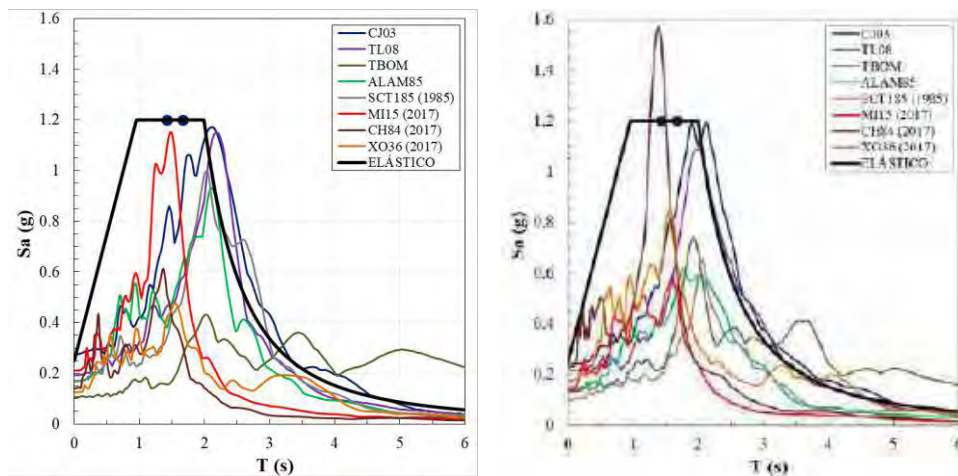
Figura 8.2. Espectros de respuesta para modelo de ocho entrepisos en zona de transición



a) Dirección EW

b) Dirección NS

Figura 8.3. Espectros de respuesta para modelo de 15 entrepisos en zona IIIa



a) Dirección EW

b) Dirección NS

Figura 8.4. Espectros de respuesta para modelo de 24 entrepisos en zona IIIb

8.3 Parámetros dinámicos evaluados

Con base en los resultados de los análisis dinámicos paso a paso no lineales, se evaluó el comportamiento de los edificios diseñados en el capítulo seis. A partir de una serie de gráficas y figuras, se estudiaron diversos parámetros de interés del comportamiento sísmico que a continuación se enumeran y comentan a detalle:

a) Curvas de histéresis de los disipadores de energía ADAS y BRBs

Estas gráficas ilustran el comportamiento cíclico de cada dispositivo de disipación de energía, para cada uno de los entrepisos donde fueron colocados. Por cuestiones prácticas, en las figuras relacionadas con este parámetro evaluado, se observa el comportamiento de los disipadores de un solo marco exterior, para cada dirección de análisis (figura 8.5). En color verde se aprecia el comportamiento de los disipadores tipo ADAS; en color morado se grafica el comportamiento cíclico de los BRBs. Se tiene en el eje x la ductilidad que cada dispositivo desarrolla como una relación entre el desplazamiento desarrollado y el desplazamiento de fluencia. Asimismo, en el eje de las y se monitorea la sobrerresistencia a nivel dispositivo, como una relación entre la fuerza cortante (ADAS) o axial (BRB), que desarrolla el disipador entre su resistencia a fluencia.

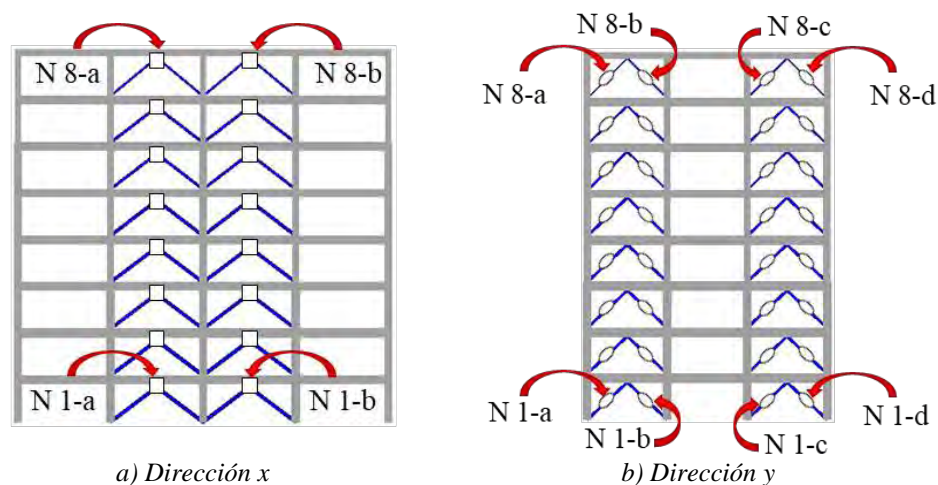


Figura 8.5. Nomenclatura de los disipadores de energía en marcos perimetrales

b) Curvas de histéresis de entrepiso y globales

Este parámetro permite apreciar el comportamiento cíclico inelástico global de la estructura; además, es posible identificar los entrepisos en que se desarrollan las mayores demandas inelásticas. De igual forma, con estas gráficas se obtienen parámetros adicionales como número de ciclos de comportamiento inelástico, niveles de degradación de rigidez, distorsiones máximas y residuales, ductilidades por entrepiso y globales, etcétera. Para cada una de las gráficas que se evalúan, se tiene en el eje x la distorsión de entrepiso; mientras que en el eje de las y , se grafica la relación de cortante de entrepiso en función del peso total de la estructura (V/W_T).

c) Mapeo de fluencias inelásticas

Estas figuras son una representación del nivel de daño estructural que desarrollaría cada uno de los elementos estructurales considerados, en función de la magnitud de rotación acumulada de éstos. Con el mapeo de fluencias inelásticas, es posible conocer la rotación máxima que desarrollan vigas y columnas (aunque no ocurran en el mismo intervalo de tiempo), para cada uno de los registros de aceleración inducidos. En otras palabras, permite conocer el mecanismo de deformación inelástica asociado a la falla de los disipadores de energía. El código de colores utilizado en los mapeos de fluencia de esta sección, es el mismo que se utilizó para el capítulo anterior (tabla 7.2)

d) Distorsiones de entrepiso asociadas a la primera fluencia del disipador de energía (Δ_y)

En este caso se muestran las distorsiones asociadas a la primera fluencia de cualquier elemento estructural de cada entrepiso. Para todos los casos evaluados en el presente trabajo, dicha fluencia corresponde al de los disipadores de energía. De la misma forma, se coloca en este tipo de gráficas el límite de distorsión propuesto ($\Delta_y=0.003$), con el objetivo de definir si este límite es el adecuado, o si requiere ajustes.

e) Envolventes de distorsiones máximas por entrepiso (Δ_{max})

Para la determinación de la distorsión máxima, se tomó en cuenta el efecto cíclico que presentarían los elementos estructurales ante una excitación sísmica. Por tal motivo, se considera que el valor adecuado para este parámetro, se mide desde la posición asociada al cambio de dirección de la fuerza cortante (figura 8.6); este valor no necesariamente corresponde a la posición del estado inicial de la estructura descargada (Tena y Cheja 2005, Tena-Colunga *et al.* 2008, Tena y Correa 2008, Godínez 2010).

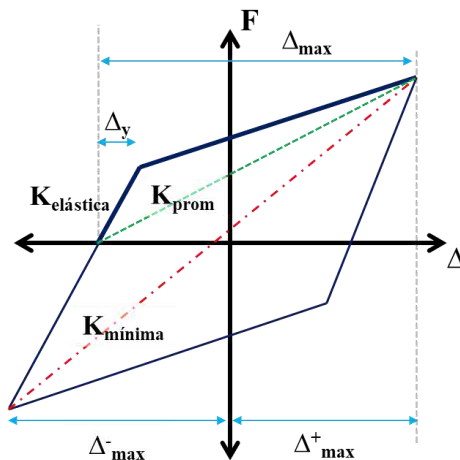


Figura 8.6. Definición de parámetros a partir de ciclos y medios ciclos de histéresis, generalmente asimétrico (Adaptado de Tena y Correa 2008)

f) Demandas máximas de ductilidad por entrepiso y globales

Los valores reportados con estas gráficas relacionan la distorsión de fluencia y la distorsión máxima absoluta. Este parámetro permite tener un índice del nivel de daño que absorberá la estructura de manera general; además, se compara de manera indirecta con el factor de comportamiento sísmico Q usado en la parte de diseño.

g) Sobrerresistencia máxima asociada a los registros de aceleración (V_y / V_{max})

La sobrerresistencia máxima relaciona el cortante máximo con el cortante de fluencia, ya sea a nivel de entrepiso o de manera global; éstos se obtienen de los ciclos histeréticos y se reportan los máximos absolutos. De la misma manera que con el parámetro anterior, éste servirá para compararlo con el valor de R utilizado en la parte de diseño, el cual es función de la relación de esbeltez del edificio.

h) Envolventes de cortantes de entrepiso máximos normalizadas con el peso total de la estructura (V/W_T)

En las gráficas que representan a este valor, se coloca al cortante de entrepiso máximo normalizado respecto al peso total de la estructura; aunque para cada entrepiso, dicho cortante haya ocurrido en instantes diferentes de tiempo del registro de aceleración. De manera similar a otras gráficas reportadas en este capítulo, se representa el comportamiento de la dirección x con círculos en color verde, mientras que para la dirección y con rombos en color morado.

i) Porcentaje de ciclos inelásticos con respecto al número total de ciclos demandados por los movimientos del terreno (CH_{ine} / CH_{total})

De las curvas de histéresis de entrepiso es posible obtener la cantidad de ciclos en el cual se desarrolla comportamiento inelástico, durante la duración del registro de aceleración para cada dirección. Este parámetro propuesto y usado en diversos equipos de investigación a cargo del Dr. Tena (Tena y Cheja 2005, Tena y Correa 2008, Tena-Colunga *et al.* 2008, Godínez 2005), toma en cuenta la variación en la amplitud de los ciclos histeréticos, consecuencia de las características inherentes de cada señal sísmica. Sin embargo, este valor por sí solo, no indica el tamaño de dicha amplitud (Tena-Colunga *et al.* 2008).

j) Cociente de la rigidez secante mínima de entrepiso asociada a medios ciclos histeréticos inelásticos (K_{min}) con respecto a la rigidez elástica de entrepiso (K_{el})

Las gráficas que relacionan este parámetro toma en cuenta la rigidez “pico a pico” o la rigidez secante mínima inelástica (figura 8.6). En otras palabras, con este valor se asocia el medio ciclo histerético de amplitud máxima. Se presenta como un cociente de la rigidez elástica global o por entrepiso de cada dirección de análisis de los edificios.

- k) Cociente de la rigidez secante de entrepiso promedio asociada a medios ciclos histeréticos inelásticos (K_{prom}) con respecto a la rigidez elástica de entrepiso (K_{el})

Este parámetro relaciona el cociente entre la rigidez promedio y la rigidez elástica de cada entrepiso. La rigidez promedio se calcula a partir del desplazamiento monitoreado en ausencia de fuerza cortante al punto de máximo desplazamiento para cada medio ciclo (figura 8.6). Al normalizar este parámetro con la rigidez elástica del entrepiso, se consigue un valor que cuantifica la degradación de rigidez cíclica efectiva debida a la deformación inelástica. Mientras más cercano sea este valor a 1.0, el entrepiso se comporta, en promedio en la fase de comportamiento inelástico, de manera más cercana a una respuesta elástica. En otras palabras, un valor cercano a uno establece que una respuesta no lineal muy reducida del entrepiso durante el intervalo de comportamiento inelástico del mismo, ligado normalmente a fluencias incipientes y deformaciones residuales despreciables de los elementos estructurales resistentes del entrepiso.

- l) Distorsiones residuales (d_r)

En pasados eventos sísmicos se ha observado que algunas estructuras han tenido que ser demolidas debido a la gran magnitud de sus deformaciones laterales permanentes, incluso cuando éstas no presentan colapso parcial o daños severos en sus componentes estructurales (Ruiz y Miranda 2006). En estas gráficas se evalúa la distribución de las distorsiones residuales en cada uno de los entrepisos, la cual depende principalmente de la distorsión máxima, así como de la respuesta dinámica durante el tiempo remanente de la excitación sísmica y de su vibración libre (Henry *et al.* 2016). La distorsión residual que se grafica en estas figuras es la distorsión última que desarrolla el entrepiso en el último paso de tiempo considerado de la excitación sísmica (figura 8.7). Para este estudio, se agregaron a todos los registros quince segundos de ceros de aceleración para simular la respuesta en vibración libre.

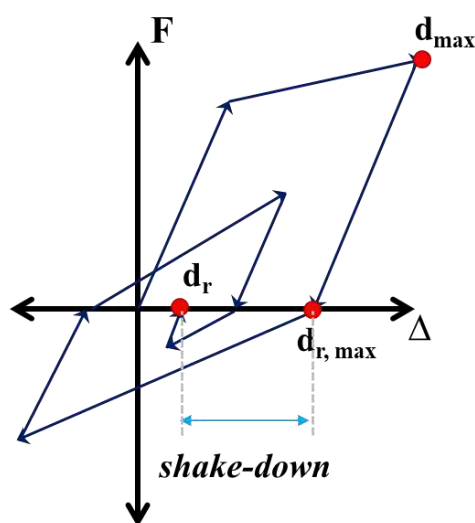


Figura 8.7. Comportamiento dinámico *shake-down* (Adaptado de Henry *et al.* 2016)

m) Relación de distorsiones residuales ($d_r / d_{r,max}$)

Se cuantifica una relación de distorsiones residuales que relaciona la distorsión residual última (d_r), y la distorsión máxima residual posible ($d_{r,max}$). Ésta última es la distorsión residual que ocurre inmediatamente después de que se presenta la descarga cuando el ciclo desarrolla su desplazamiento lateral máximo (figura 8.7). Como comenta Henry y colaboradores (2016), este comportamiento se conoce como el efecto “*shake-down*”, y fue propuesto por McRae y Kawashima en 1997.

n) Relación de distorsiones residuales máximas (d_r / d_{max})

Finalmente, se evalúa un parámetro adimensional que relaciona la distorsión residual (d_r) con la distorsión máxima absoluta etiquetada como d_{max} en la figura 8.7, o bien, nombrada como Δ^+_{max} o Δ^-_{max} de la figura 8.6, según resulte el mayor valor absoluto de éstas.

8.4 Modelos de ocho entrepisos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los análisis dinámicos paso a paso no lineales de los modelos con ocho entrepisos (figuras 8.9 a 8.43). Los registros de aceleración a los que se sometieron son representativos de la zona de transición de la Ciudad de México, cuyas características principales se resumen en la tabla 8.1. Por cuestiones prácticas, se muestran sólo los resultados máximos que desarrolla la estructura, de un par de registros de aceleración, en función de la energía que disipan los dispositivos de control y del mapeo de fluencias inelásticas. Los resultados obtenidos por los otros pares de registros de aceleración inducidos para estos modelos se presentan en el apéndice F.

8.4.1 Base rígida

Se muestran en primera instancia los resultados del edificio de ocho entrepisos modelando su base como empotrada (figura 8.8). Los resultados máximos se presentaron para los pares de registros de aceleración identificados como EO30 para el caso B de excitación (figura 8.1b), es decir, para la dirección x se utilizó el registro EO30 NS y para la dirección ortogonal a ésta el registro EO30 EW, ambas de manera simultánea. En las figuras 8.9 y 8.10 se presentan los ciclos histeréticos que desarrollan los dispositivos ADAS y BRB para los registros antes mencionados. Se observa de la figura 8.9 que todos los dispositivos ADAS están participando no linealmente; asimismo, en los entrepisos dos a cuatro se presentan las mayores ductilidades locales, sin embargo, en ningún caso $\mu_d \geq 8$. Para el caso de los dispositivos BRBs, se observa que en los entrepisos dos y tres, los disipadores desarrollan una ductilidad local de $\mu_d \geq 8$ y sus ciclos histeréticos quedan fuera de los límites de la gráfica, lo que representaría la falla de los elementos en dichos entrepisos (figura 8.10).

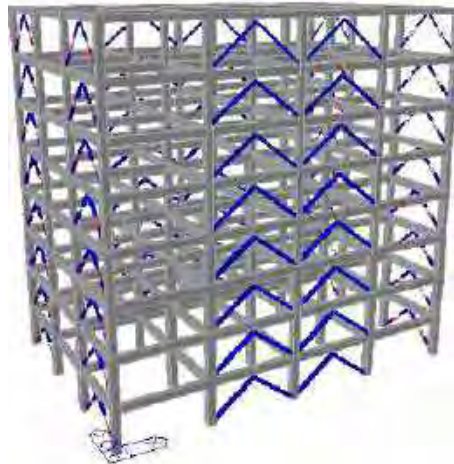


Figura 8.8. Modelo de ocho entrepisos con base rígida

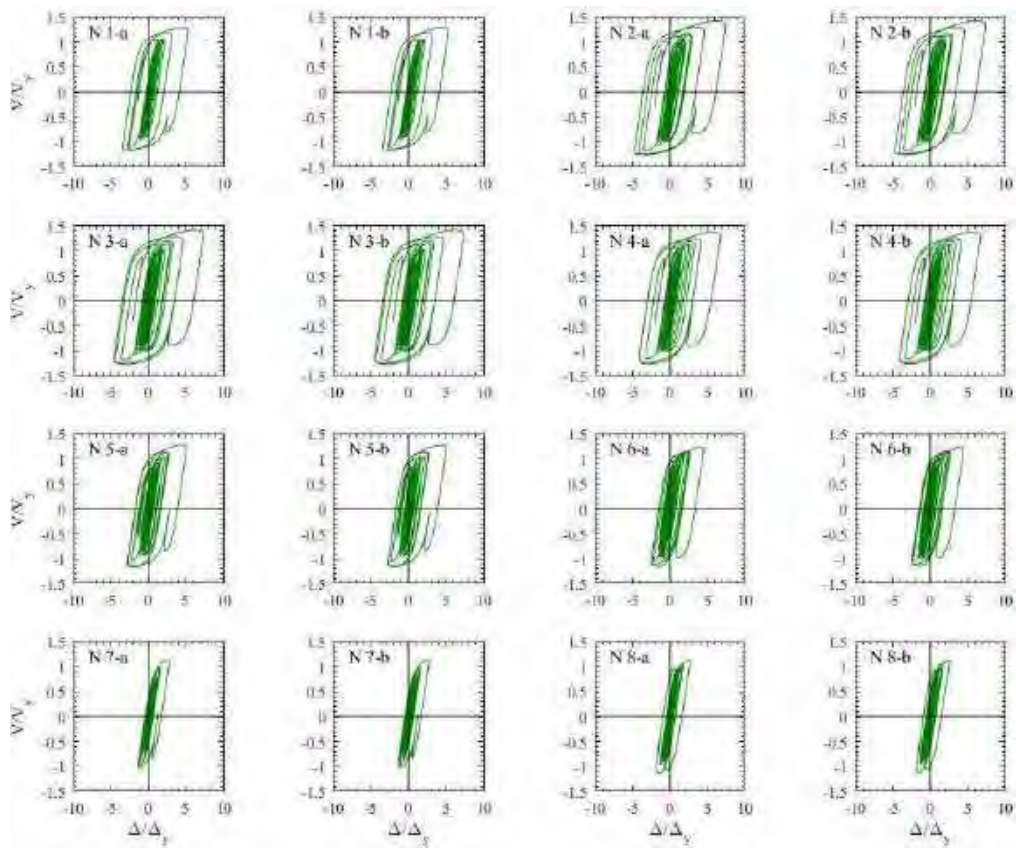


Figura 8.9. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, modelo de ocho entrepisos con base rígida, registros de aceleración EO30b

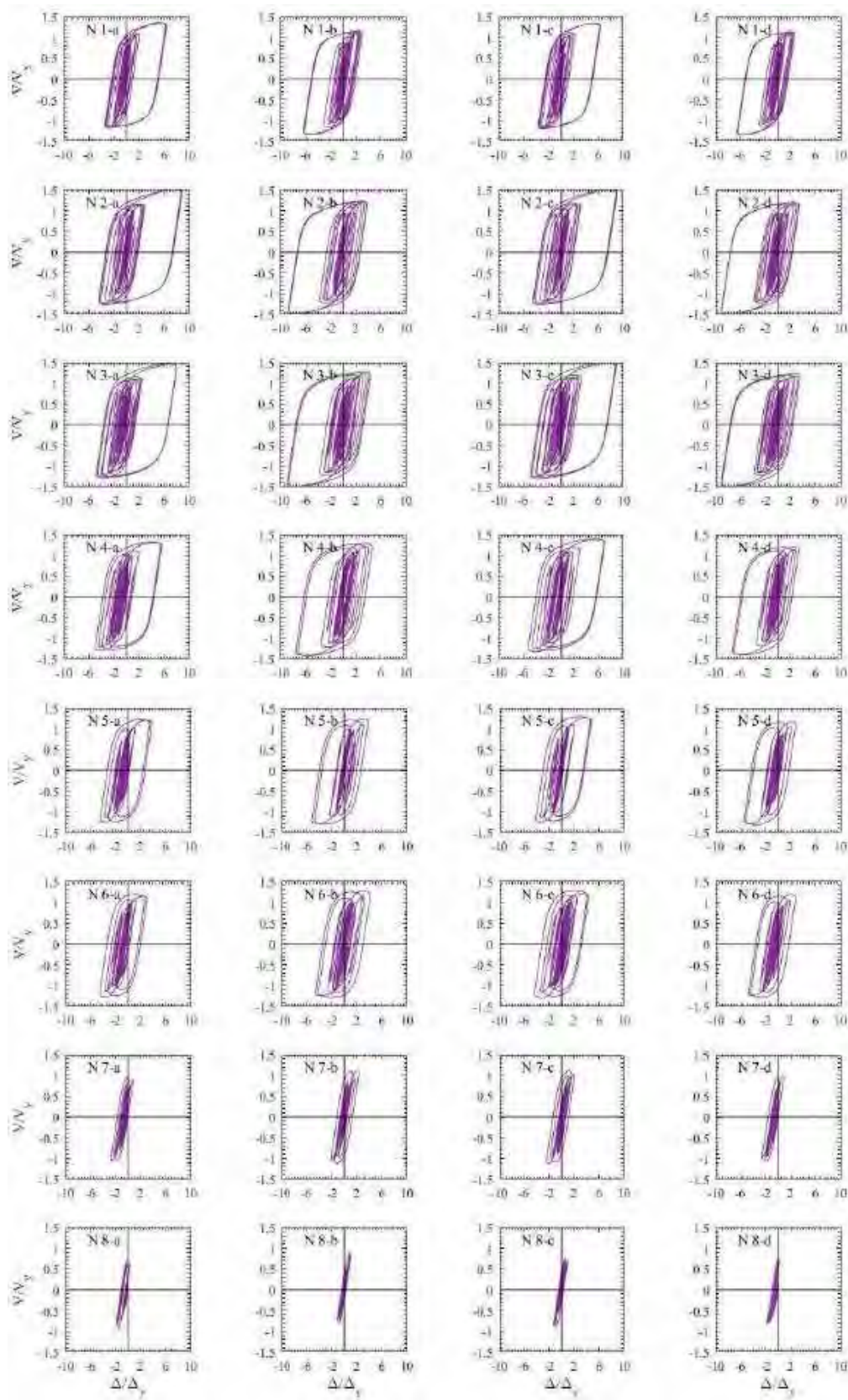


Figura 8.10. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, modelo de ocho entrepisos con base rígida, registros de aceleración EO30b

En las figuras 8.11 y 8.12 se presentan los ciclos histéricos por entrepiso que se desarrollan en la dirección x y en la dirección y respectivamente. Se observa de éstas que todos los entrepisos desarrollan ciclos histéricos estables sin degradación de rigidez. Los entrepisos que presentan los mayores valores de distorsión son aquéllos donde los disipadores alcanzan la mayor magnitud de ductilidad local (entrepisos dos y tres). Si se correlacionan las curvas de la figura 8.11 con el mapeo de fluencias inelásticas de la figura 8.13, se aprecia que el comportamiento no lineal es exclusivo de los disipadores tipo ADAS, donde esquemáticamente se aprecia que en los entrepisos dos y tres el código de colores para dichos dispositivos cambian (color naranja). Aunque los disipadores no desarrollan su máxima ductilidad ($\mu_d \geq 10$), se observa un comportamiento resiliente en la estructura, dado que columnas y contravientos permanecen elásticos, a pesar que cuatro vigas del marco exterior, presentan fluencias inelásticas menor al 5% de la rotación última de éstas (figura 8.13). Por otra parte, se observa del mapeo de fluencias en la dirección y , que todos los dispositivos BRBs participan de manera inelástica y las máximas ductilidades se presentan en los entrepisos dos y tres ($\mu_d \geq 8$). Sin embargo, las vigas de estos entrepisos desarrollan también mayores valores de rotación y se aprecia de la figura 8.14 con un cambio en el código de color para éstas; aunque, dichas rotaciones no son mayores al 10% de la rotación última de esas secciones (V1y). En las figuras 8.15 y 8.16 se presentan los mapeos de fluencias inelásticas residuales en el último paso de tiempo ante vibración libre. Se observa de éstas, a partir de los códigos de colores, que las vigas reducen su magnitud de rotación a menos del 5% de la rotación última. Esta reducción de la rotación es más significativa en los entrepisos donde los BRBs desarrollan las mayores ductilidades, e incluso en algunos elementos la representación de participación no lineal desaparece dado que la magnitud de rotación residual es menor al 1% de la rotación última (figura 8.16).

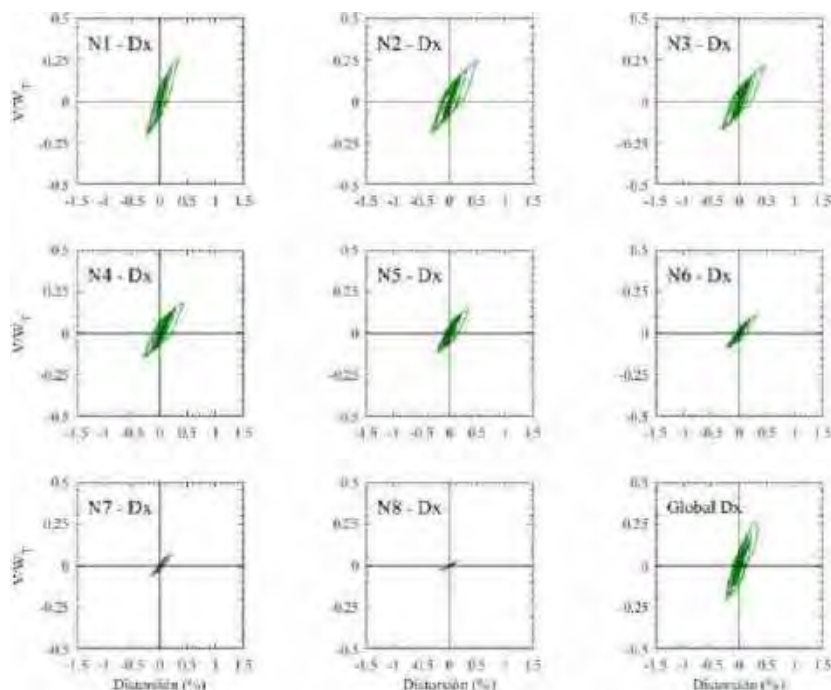


Figura 8.11. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración EO30b

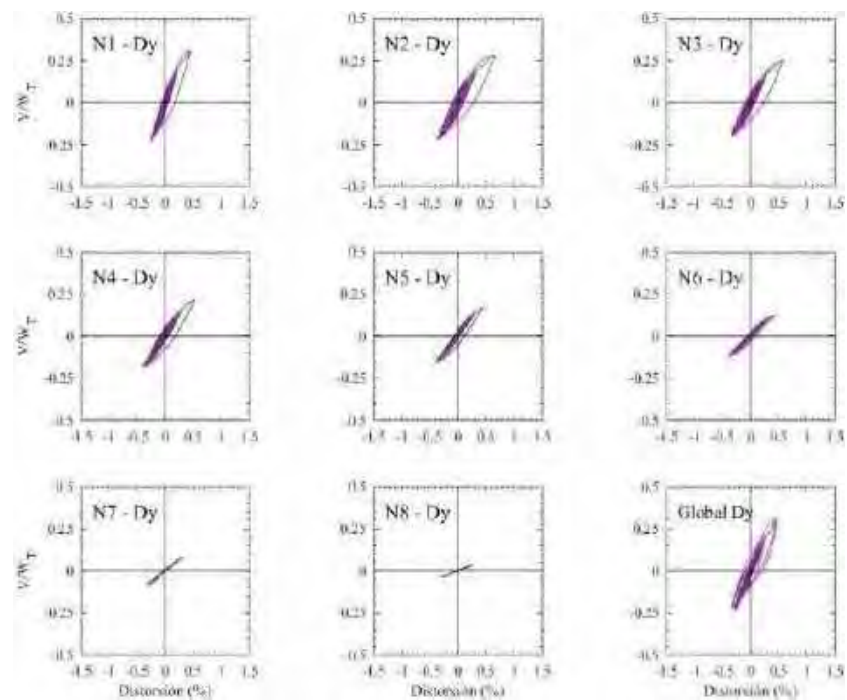
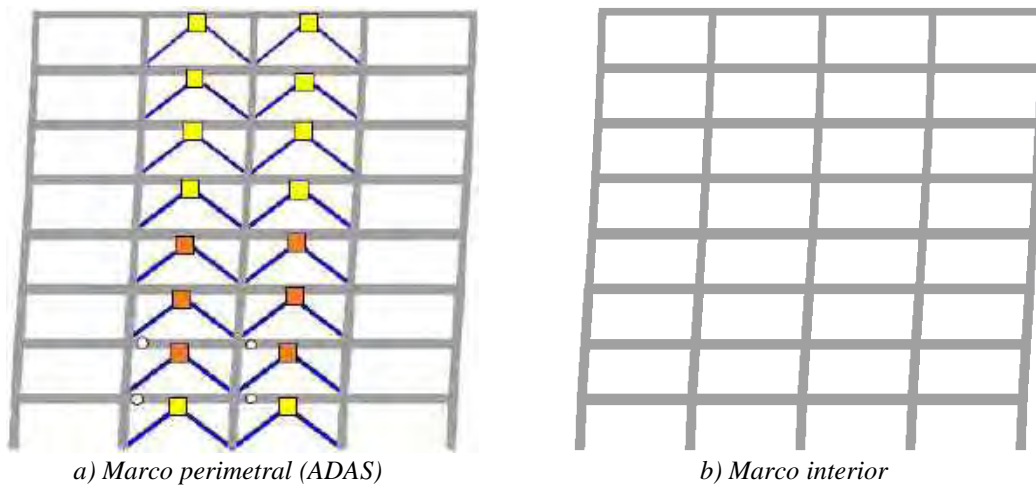


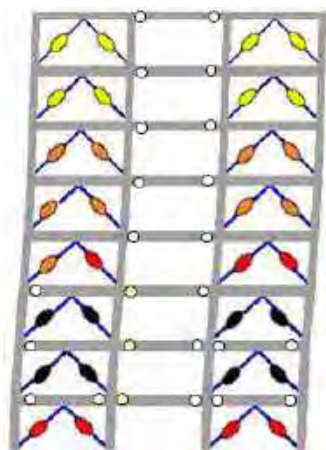
Figura 8.12. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración EO30b



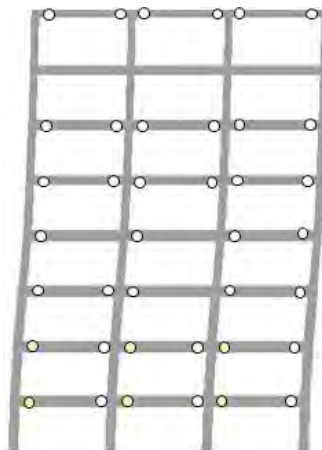
a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

Figura 8.13. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección x, para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración EO30b

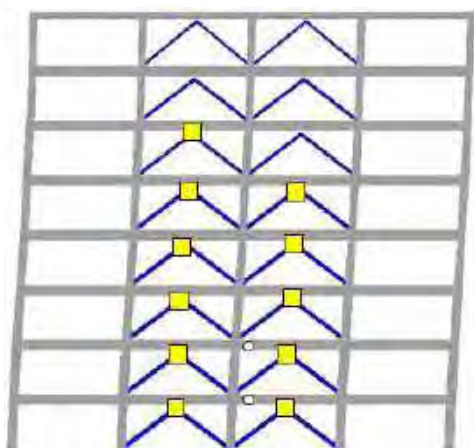


a) Marco perimetral (BRB)

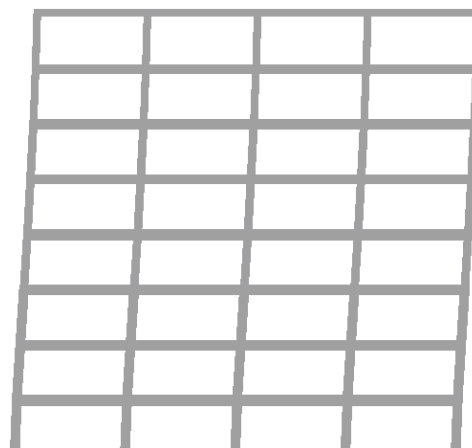


b) Marco interior

Figura 8.14. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración EO30b

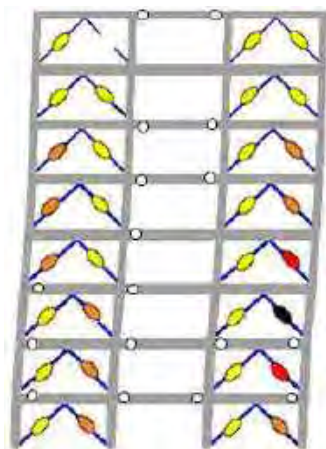


a) Marco perimetral (ADAS)

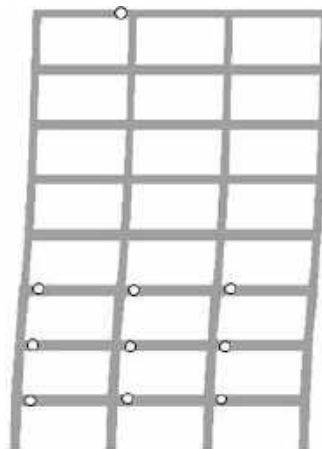


b) Marco interior

Figura 8.15. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección x, para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración EO30b



a) Marco perimetral (BRB)



b) Marco interior

Figura 8.16. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración EO30b

En la figura 8.17 se presentan los ciclos histeréticos de las vigas con los mayores valores de rotación cuando se le induce ante los registros de aceleración EO30; también, en líneas discontinuas se aprecia la idealización que se utilizó para el modelado del comportamiento no lineal de estos elementos. Se aprecia de éstas, que el comportamiento no lineal es incipiente para ambos casos; además, el agrietamiento de la sección estaría regido por momento positivo en ambas condiciones, y que la máxima rotación reportada es menor a 0.007 rad.

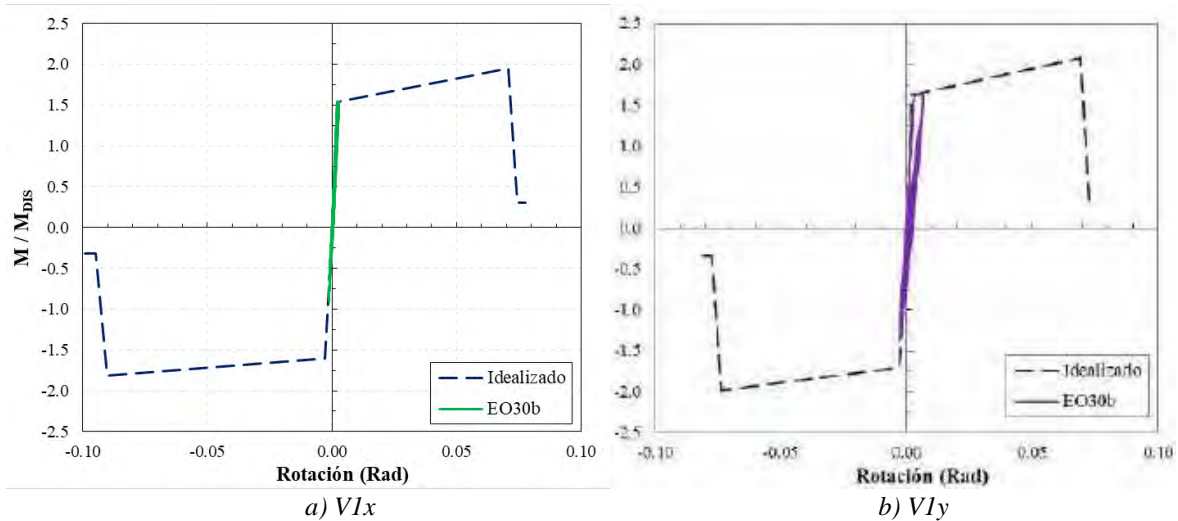


Figura 8.17. Máximas rotaciones en vigas para el edificio de ocho entrepisos con base rígida

8.4.2 Base flexible

A continuación se presentan los resultados promedios y máximos para el edificio de ocho entrepisos tomando en cuenta la interacción suelo-estructura (figura 8.18). Los resultados máximos se presentaron para los registros de aceleración identificados como EO30, de la misma manera que para al edificio modelando su base como empotrada. La respuesta máxima de los disipadores tipo ADAS se presentó con el caso A; mientras que para los dispositivos BRBs, ésta fue con el caso B (figura 8.1). En las figuras 8.17 a 8.20 se presentan los ciclos histeréticos que desarrollan los dispositivos ADAS y BRB para los registros antes mencionados. En las figuras 8.17 y 8.18 se presentan aquéllos de los disipadores ADAS para el caso A y B de los registros EO30 respectivamente. De la misma forma, en las figuras 8.19 y 8.20 se presentan los ciclos histeréticos de los BRBs para el caso A y B de los mismos registros mencionados.

Se observa de las figuras 8.19 y 8.20 que todos los dispositivos ADAS están participando no linealmente para los dos casos evaluados, aunque, los disipadores de los entrepisos dos y tres del caso A son los que desarrollan mayores ductilidades del orden de $\mu_d > 8$ (figura 8.19); por otro lado, en el caso B los disipadores presentan ductilidades de $\mu_d < 6$ (figura 8.20). Se muestra para el caso A de los dispositivos BRBs (figura 8.21), que éstos desarrollan ductilidades de $\mu_d < 6$, e incluso un par de éstos se comportan de manera lineal en el último entrepiso del edificio. Como se mencionó en el párrafo anterior, es en el caso B donde los BRBs desarrollan sus respuestas máximas. Se aprecia de la figura 8.22 que todos los dispositivos están participando de manera no lineal, y para los entrepisos dos y tres, todos éstos fallarían, dado que sobrepasan la ductilidad máxima local que este tipo de elemento es capaz de soportar, y gráficamente se aprecia que dichos ciclos se salen de los límites de la gráfica.

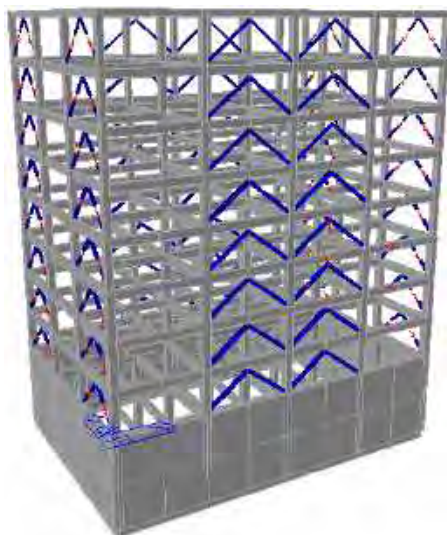


Figura 8.18. Modelo de ocho entrepisos con efectos de interacción suelo-estructura

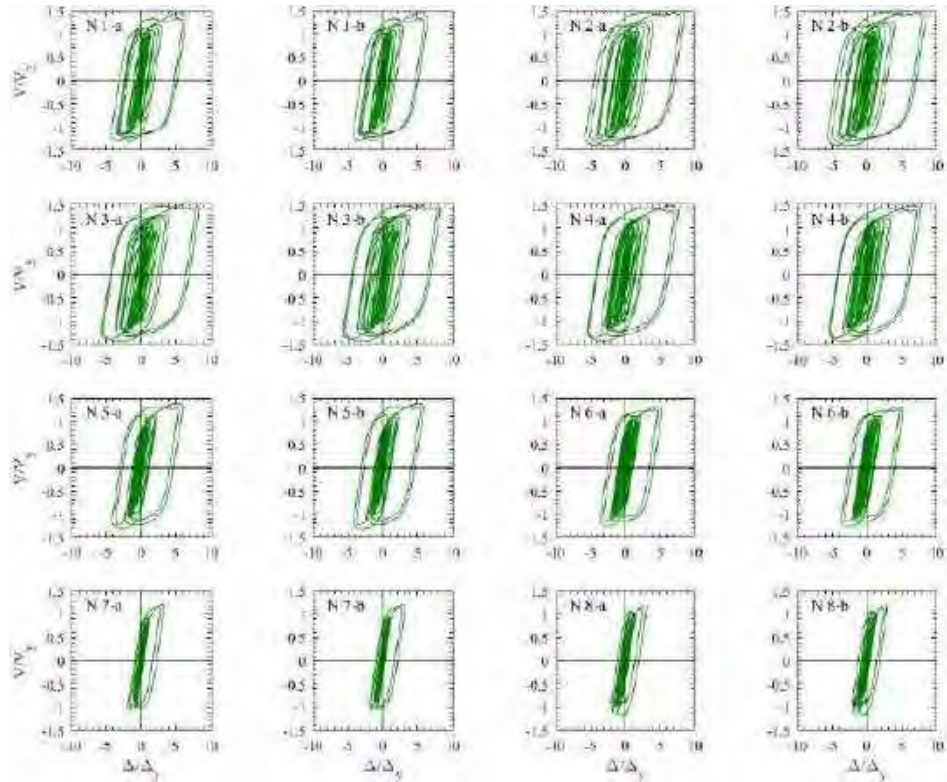


Figura 8.19. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, modelo de ocho entrepisos con base flexible, registros de aceleración EO30a

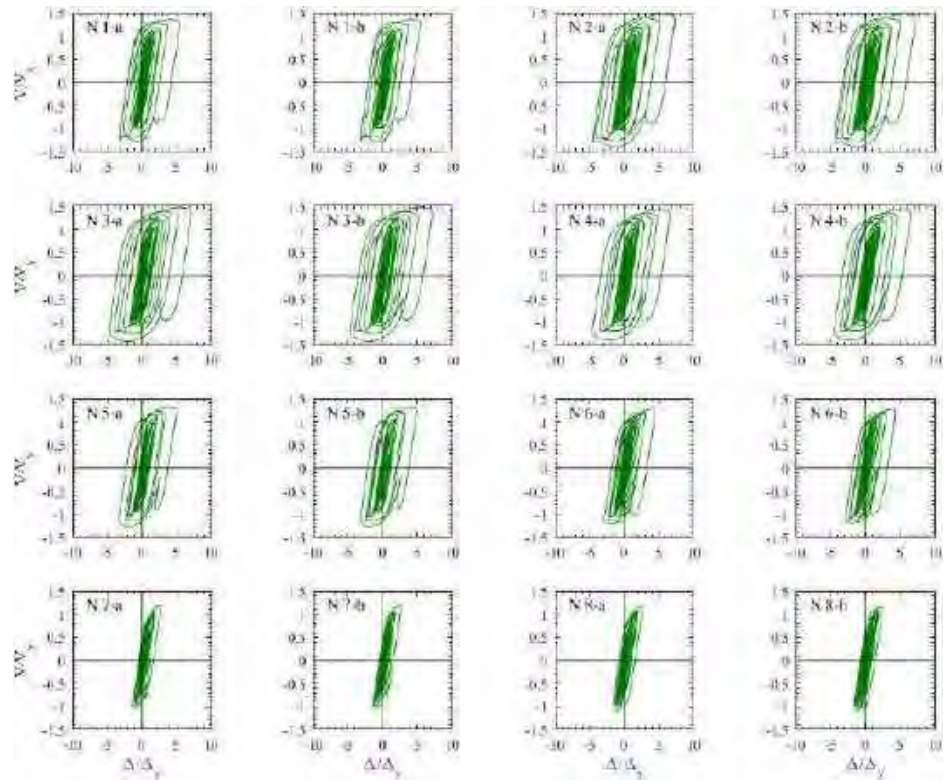


Figura 8.20. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, modelo de ocho entrepisos con base flexible, registros de aceleración EO30b

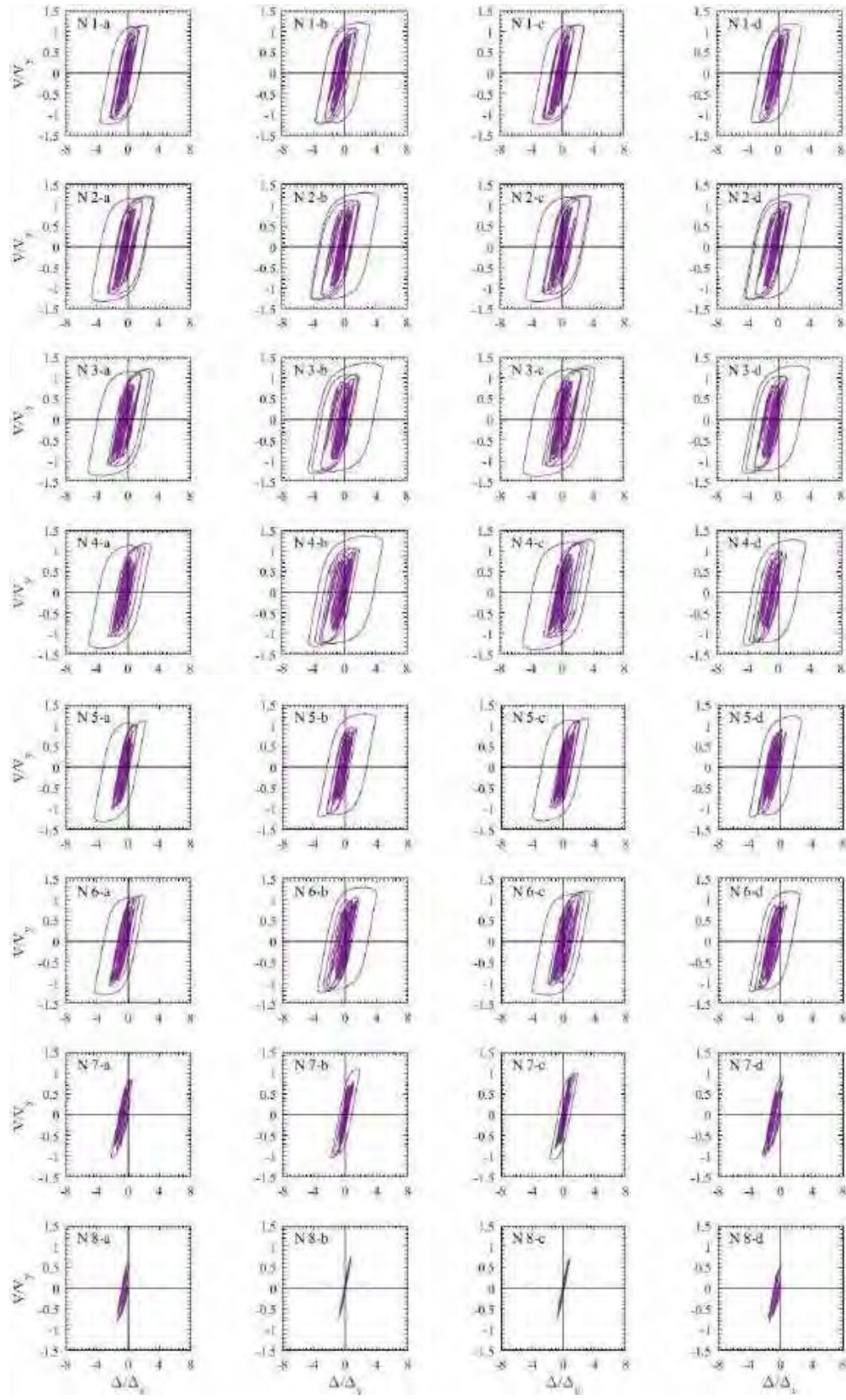


Figura 8.21. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, modelo de ocho entrepisos con base flexible, registros de aceleración EO30a

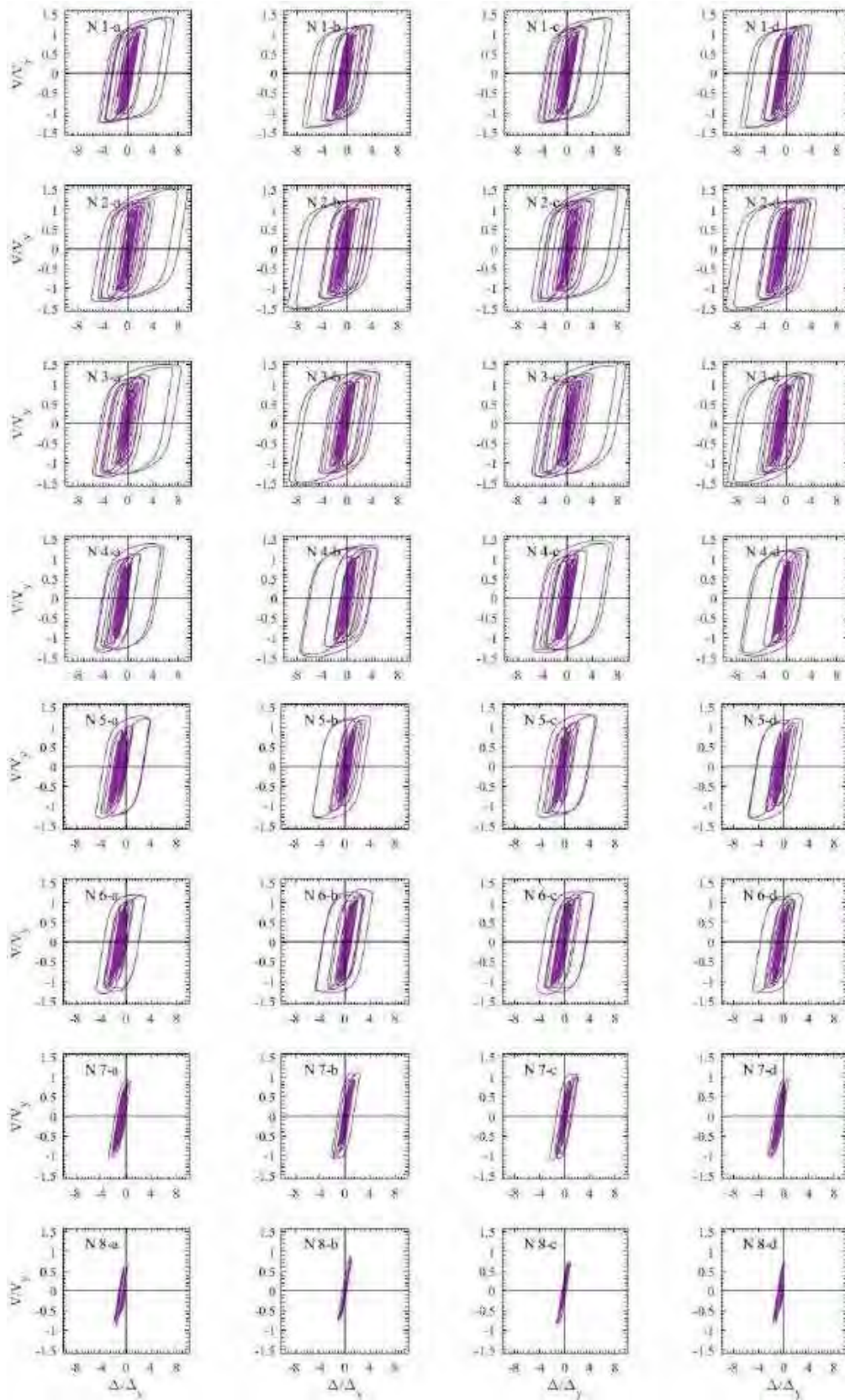


Figura 8.22. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, modelo de ocho entrepisos con base flexible, registros de aceleración EO30b

En las figuras 8.23 a 8.26 se presentan los ciclos histéricos por entrepiso que se desarrollan en la dirección x y y . Se aprecia de éstas que las primeras tres gráficas corresponden a los ciclos histéricos de los entrepisos de los sótanos de cimentación, donde el comportamiento es elástico con valores de distorsión menores a 0.6 %. De manera general no se aprecian diferencias significativas en los ciclos histéricos que desarrollan los entrepisos en la dirección x , que se generan para el caso A y el caso B (figuras 8.23 y 8.24); sin embargo, los entrepisos dos y tres son los que presentan los mayores valores de distorsión, y son en estos mismos entrepisos donde se obtienen los mayores valores para el modelo con base rígida (figura 8.11).

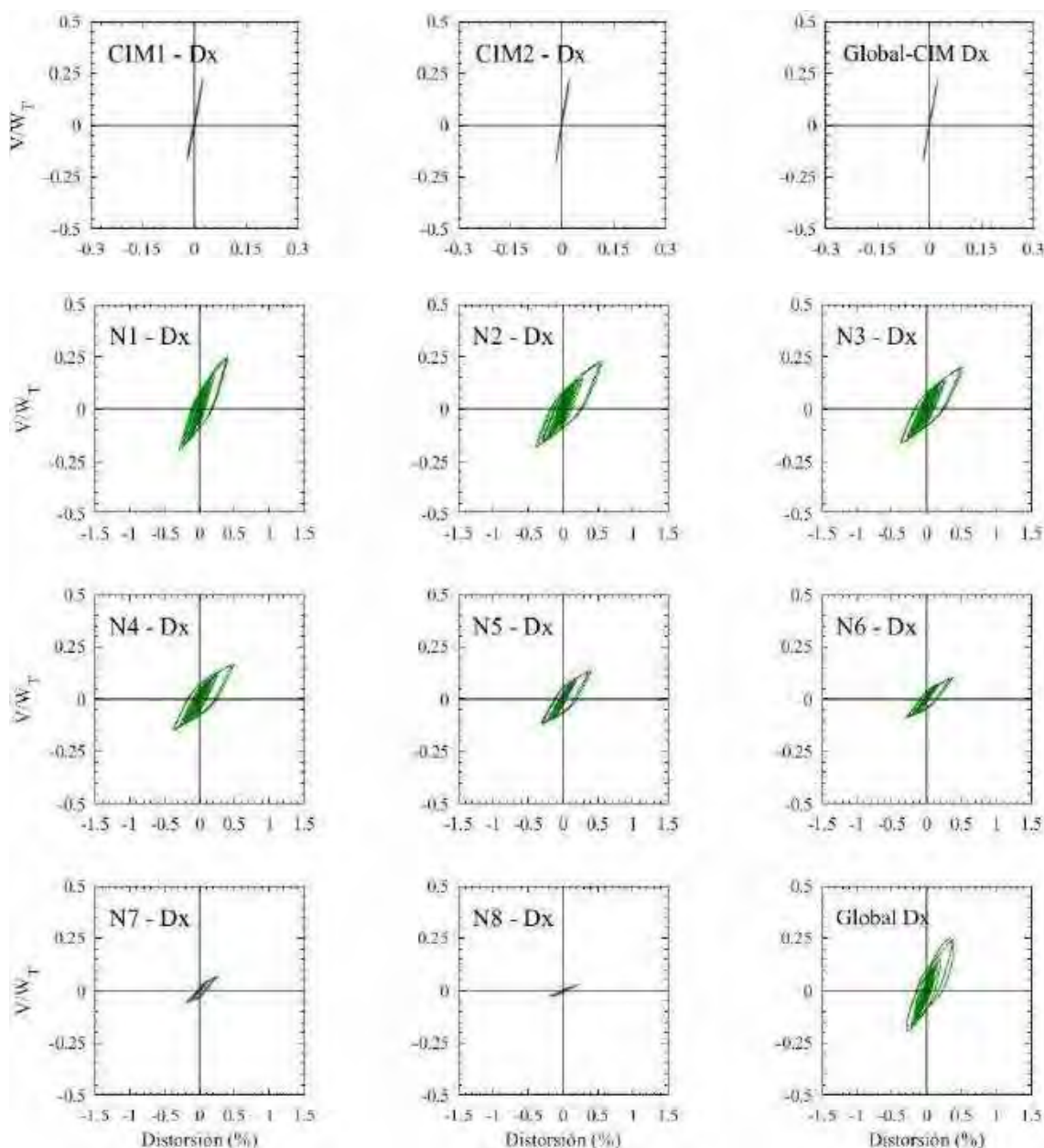


Figura 8.23. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30a

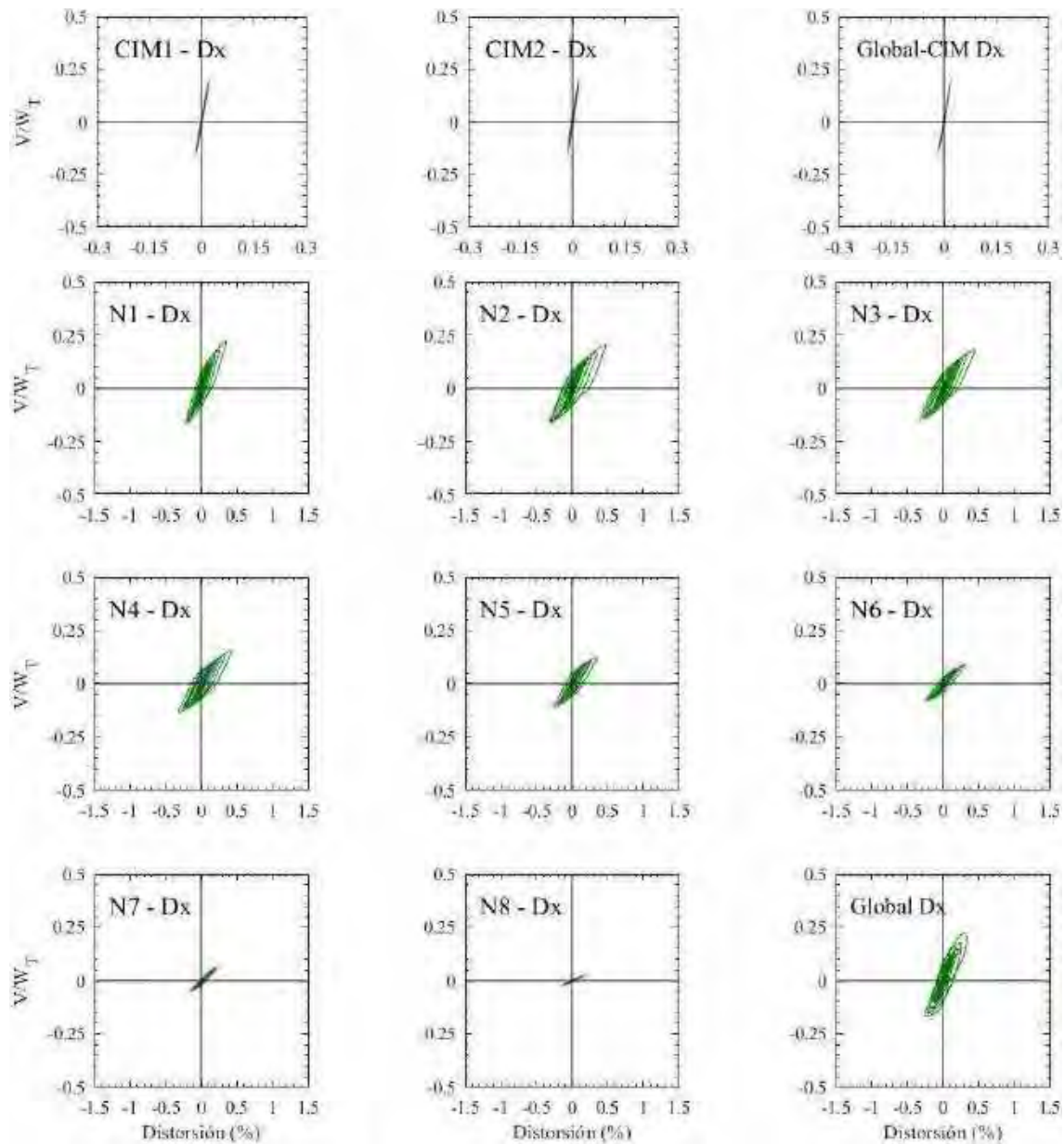


Figura 8.24. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30b

Para los ciclos histeréticos que se desarrollan en la dirección y y para el caso A y B obtenidos de los registros de aceleración EO30 (figuras 8.25 y 8.26), se observa que existen diferencias en la cantidad de ciclos y en los valores de distorsión, de manera perceptible para cada una de estas gráficas. Comparando ambos casos antes mencionados, es en el caso B cuando se obtienen mayores valores de distorsión y de cortante normalizados para los entrepisos dos y tres (figura 8.26), que son en estos niveles donde los BRBs llegan a fallar, aunque para los últimos dos entrepisos evaluados, no se aprecia comportamiento no lineal debido a que las ductilidades locales que desarrollan los BRBs de dichos entrepisos son menores a $\mu_d < 4$ (figura 8.21). Asimismo, para ambos casos, se observa el mismo comportamiento lineal que se presentan en la dirección x para los entrepisos de los sótanos.

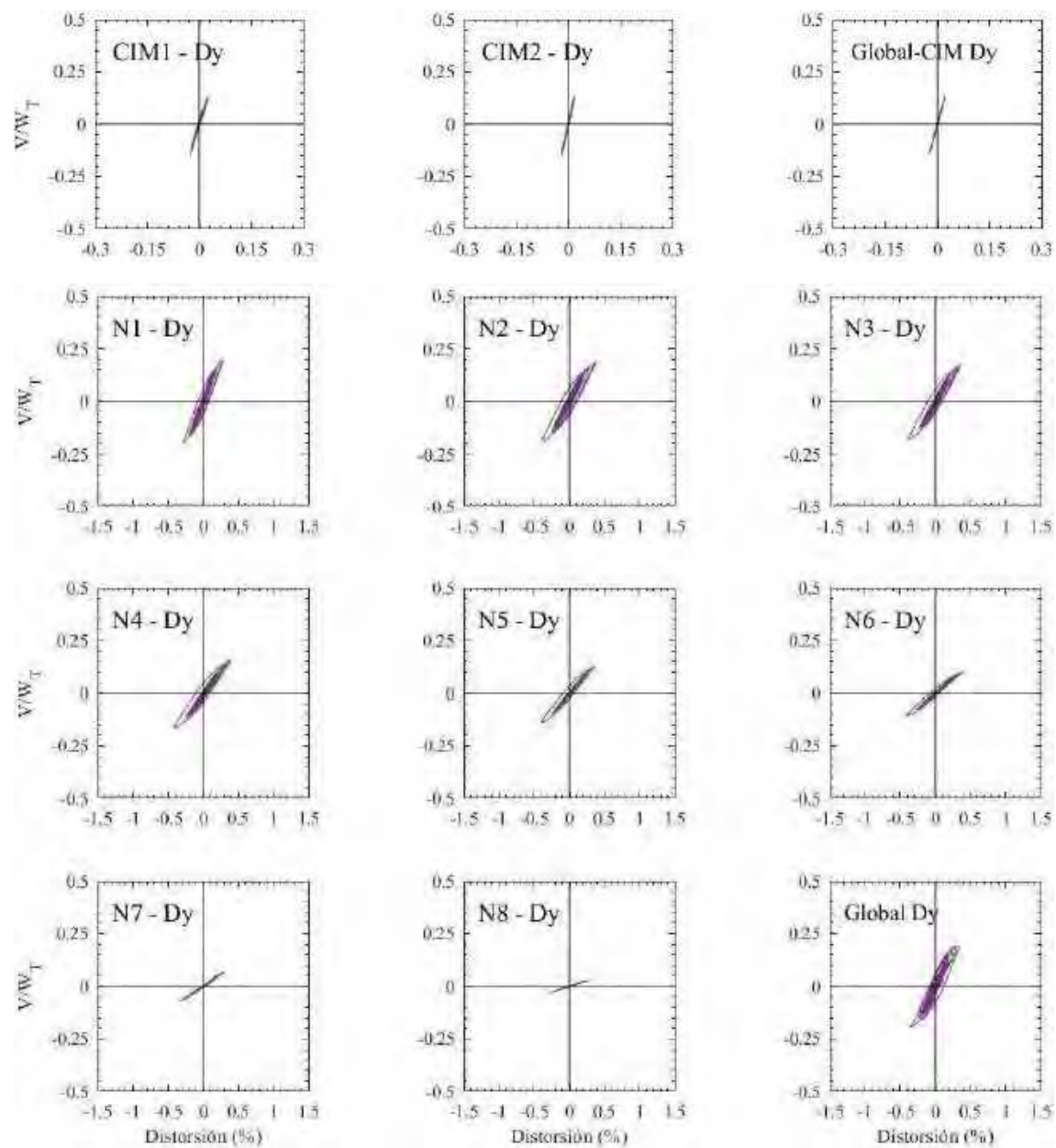


Figura 8.25. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30a

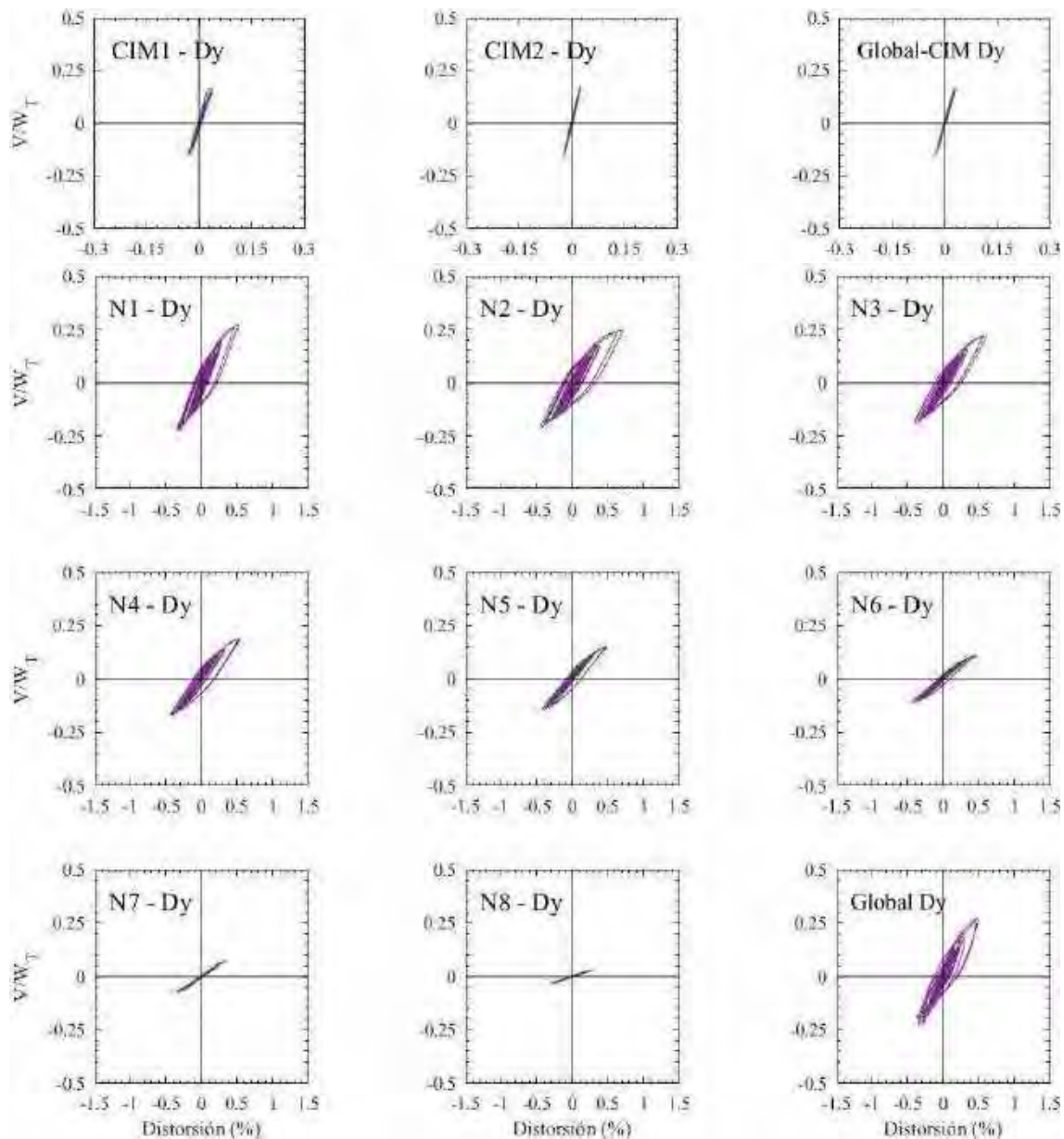


Figura 8.26. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30b

Si se correlacionan las curvas de los ciclos histeréticos con los mapeos de fluencias inelásticas de las figuras 8.27 y 8.28, se aprecia que el comportamiento no lineal es exclusivo de los disipadores tipo ADAS, donde esquemáticamente se aprecia que en los entrepisos dos y tres se obtienen las máximas ductilidades ($\mu_d \geq 8$). Además, se observa un comportamiento resiliente en la estructura, dado que columnas y contravientos permanecen elásticos, a pesar que algunas vigas presentan fluencias inelásticas menor al 5% de la rotación última de éstas (figura 8.27 y 8.28). Aunque para el caso A con el registro de aceleración EO30 se presentan mayores demandas de ductilidad para los disipadores ADAS (figura 8.27), se observa un comportamiento no lineal similar para los elementos de los marcos exteriores e interiores con fluencias incipientes (figura 8.28).

Por otra parte, en el mapeo de fluencias en la dirección y (figuras 8.29 y 8.30) se observa que la mayoría de los dispositivos BRBs participan de manera inelástica. Es con el caso B de los registros de aceleración EO30 que se presentan las máximas ductilidades para los dispositivos BRBs en los entrepisos dos y tres ($\mu_d \geq 8$). Sin embargo, las vigas de estos entrepisos, tanto para los marcos exteriores e interiores, desarrollan también mayores valores de rotación y se aprecia de la figura 8.28 con un cambio en el código de color para éstas; aunque, dichas rotaciones no son mayores al 10% de la rotación última para esas secciones (V1y).

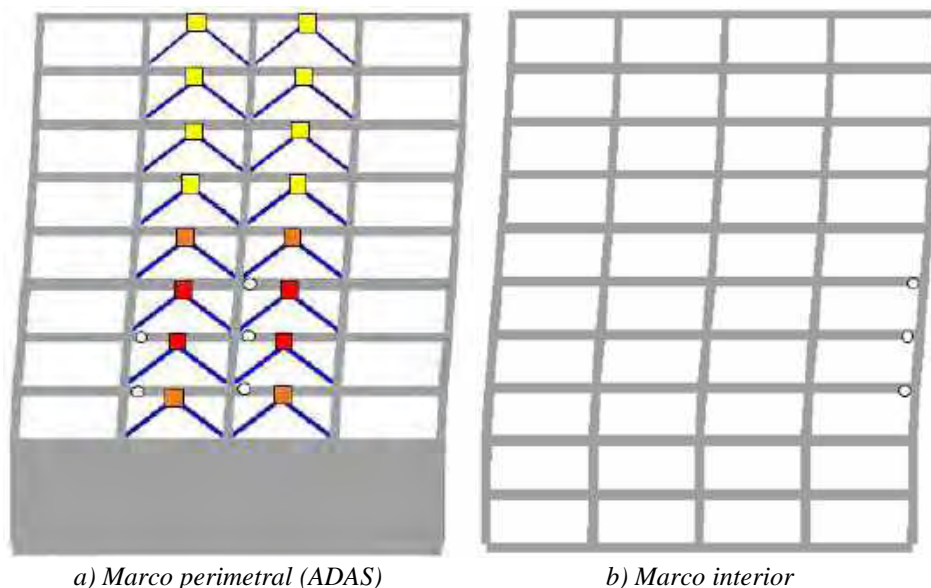


Figura 8.27. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección x, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30a

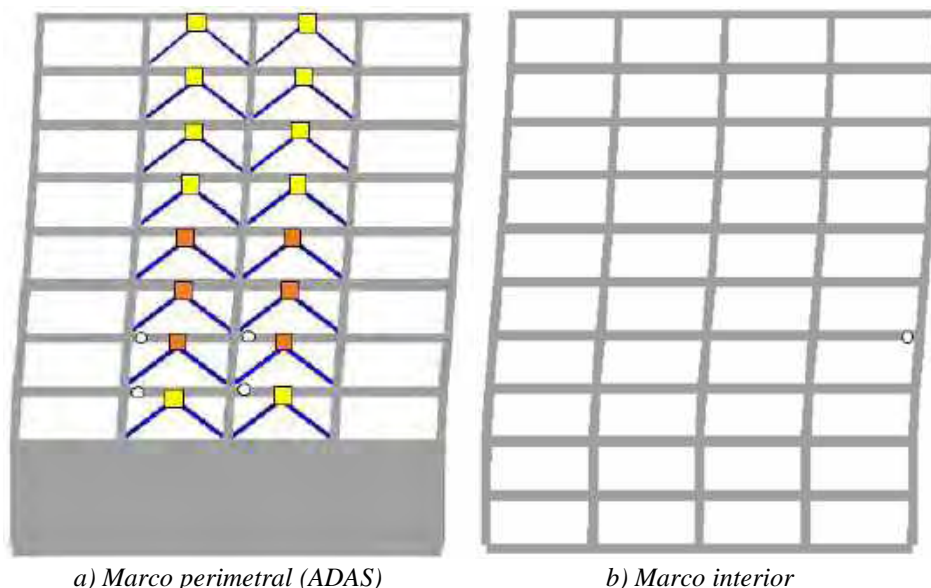
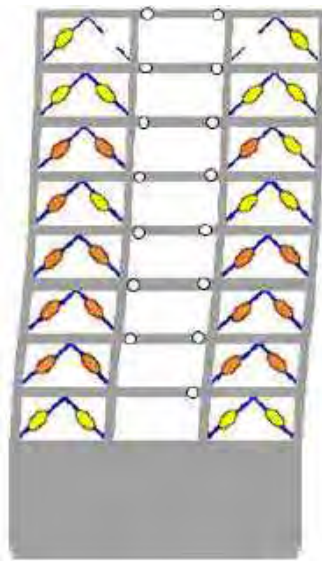
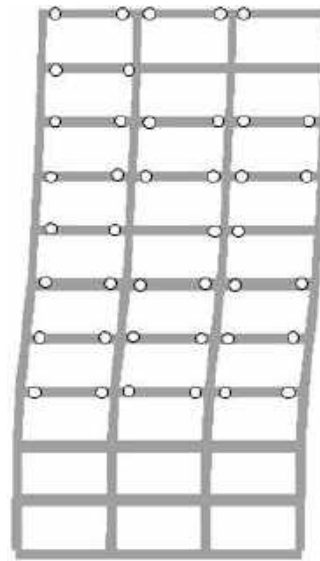


Figura 8.28. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección x, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30b

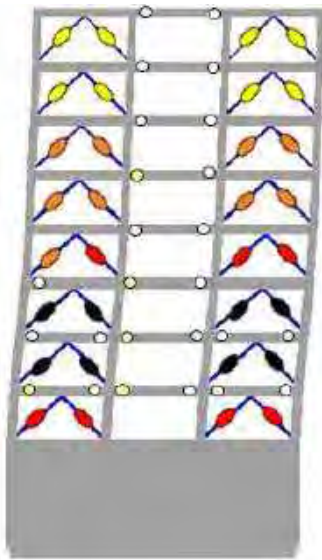


a) Marco perimetral (BRB)

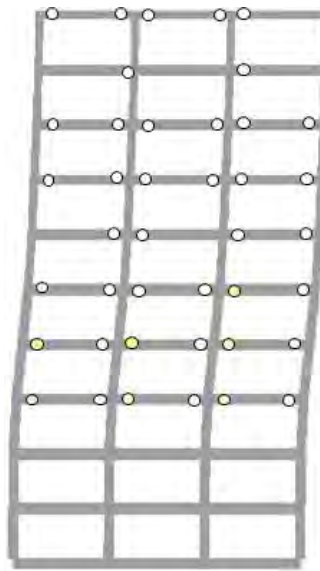


b) Marco interior

Figura 8.29. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30a



a) Marco perimetral (BRB)



b) Marco interior

Figura 8.30. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30b

En las figuras 8.31 a 8.34 se presentan los mapeos de fluencias inelásticas residuales, en el último paso de tiempo ante vibración libre, para los modelos de ocho entresijos con base flexible. Se distinguen para las figuras antes mencionadas ambas direcciones de análisis y los casos de carga que generaron la respuesta máxima en los disipadores de energía. Se aprecia de éstas, para la dirección x, que desaparece la representación de fluencia para los disipadores en los dos últimos entresijos (figuras 8.31 y 8.33), dado que la fluencia residual que

presentaron es cercana a $\mu_{ADAS} \approx 1.0$. Además, se aprecia que con el caso B de los registros de aceleración EO30, desaparece la representación de fluencias inelásticas para las vigas de los marcos interiores (figura 8.33). Por otra parte, se observa en la dirección y que las rotaciones residuales máximas en las vigas no son mayores al 5% de la rotación última de dichos elementos (figuras 8.32 y 8.34), e incluso, se aprecia que con el caso A de los registros de aceleración EO30, muy pocos elementos permanecen con una rotación residual que serían fáciles y rápidas de reparar (figura 8.32).

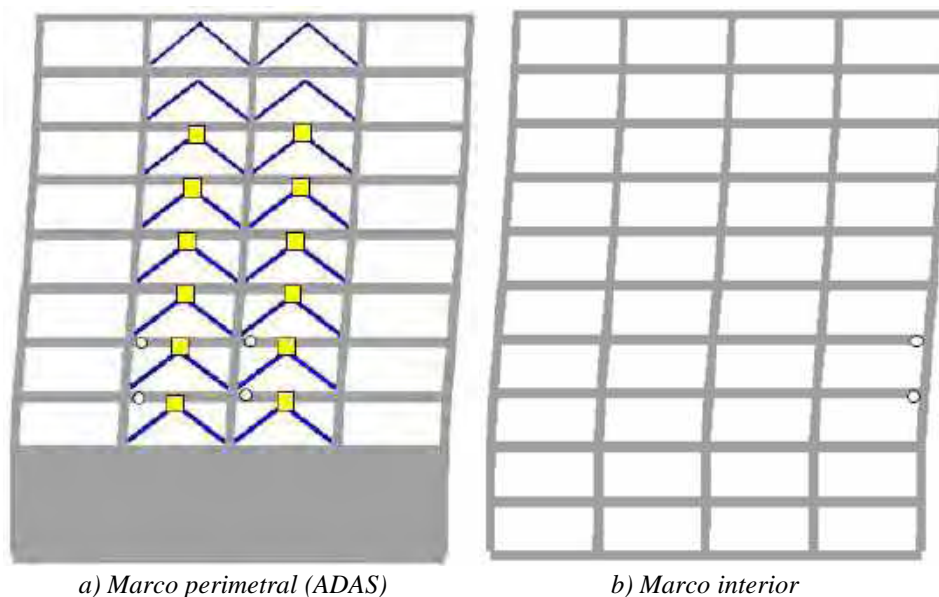


Figura 8.31. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección x, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30a

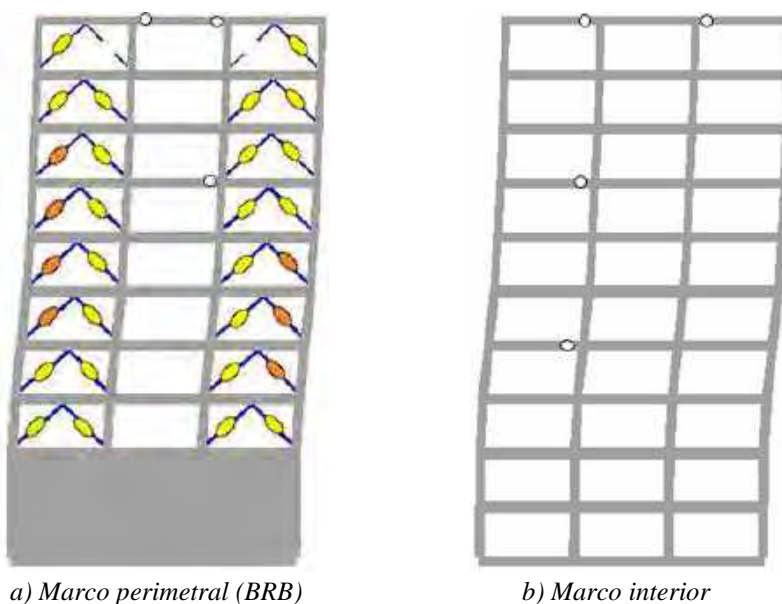
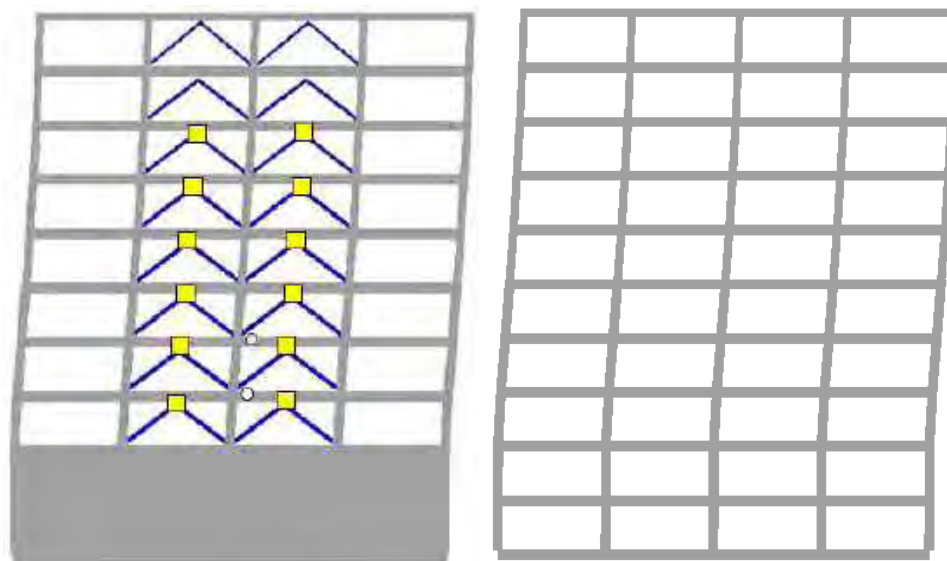


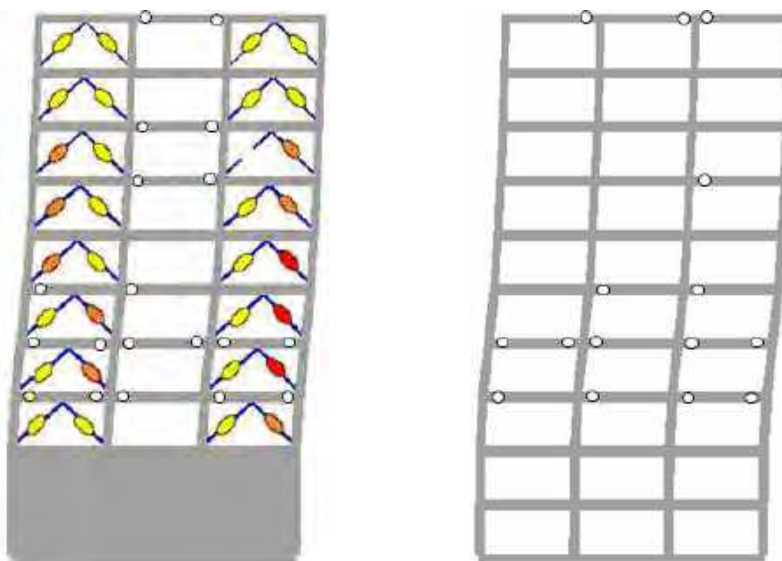
Figura 8.32. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30a



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

Figura 8.33. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección x , para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30b



a) Marco perimetral (BRB)

b) Marco interior

Figura 8.34. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección y , para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración EO30b

En la figura 8.35 se presentan los ciclos histeréticos para las vigas con los mayores valores de rotación cuando se les induce ante los registros de aceleración EO30, para el caso A y B, según se presenten las mayores rotaciones. Asimismo, en líneas discontinuas se aprecia la idealización que se utilizó para el modelado del comportamiento no lineal de dichos elementos. Se aprecia de éstas que el comportamiento no lineal es incipiente para ambos casos, a pesar del cambio en el código de colores para los mapeos de fluencias inelásticas; además, el agrietamiento de la sección estaría regido por momento positivo para la rotación máxima presentada (figura 8.35b), donde la máxima rotación reportada es de 0.0072 rad.

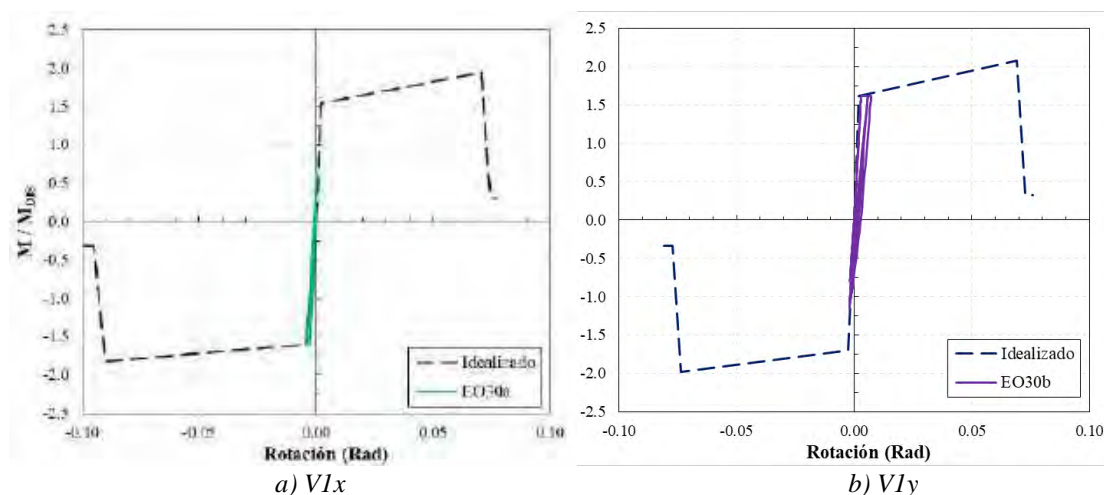


Figura 8.35. Máximas rotaciones en vigas para el edificio de ocho entrepisos con base flexible

8.4.3 Respuestas globales

En las gráficas que se presentan en esta sección, se muestran y comparan los resultados representativos de la respuesta global de los edificios de ocho niveles con base rígida y base flexible. Para cada figura en particular, se grafica la respuesta promedio generado por todos los registros de aceleración, y la respuesta máxima que se presenta por el efecto de un par de registros de aceleración simultáneos, los cuales provocaron las ductilidades máximas a los dispositivos de control de la respuesta sísmica. Por ejemplo, en las figuras 8.36 y 8.37 se reportan las distorsiones de fluencia (Δ_y) y máxima (Δ_{max}) asociadas a condiciones de servicio y al control de daño a los elementos de concreto reforzado del marco, tanto para base rígida y base flexible. Con círculos verdes se representa la distorsión promedio desarrollada para la dirección x , y con rombos morados la distorsión promedio para la dirección y . Además, se coloca en cada una de ellas las distorsiones obtenidas del proceso de diseño (capítulo seis) para cada dirección.

Se observa de las gráficas de la figura 8.36 que las distorsiones máximas generadas por los registros de aceleración EO30 son menores que los límites permisibles propuestos en la etapa de diseño, tanto para la consideración Δ_y como para la de Δ_{max} . Los mayores valores de distorsión para la condición de servicio (Δ_y) se presentan en los entrepisos siete y ocho de las direcciones x y y respectivamente. En contraste, para el parámetro Δ_{max} , los mayores valores se presentan en el entrepiso dos, que es dónde se generaron las mayores demandas de ductilidad para los disipadores de energía. Evaluando la respuesta promedio de todos los registros de aceleración inducidos para el modelo de ocho niveles con base rígida (tabla 8.1), se observa que se incrementa el valor de la distorsión de fluencia para el último entrepiso en la dirección y (figura 8.36); sin embargo, ésta sigue siendo menor que la distorsión límite permisible propuesta.

Si se comparan los resultados de distorsiones obtenidas con el modelo con base rígida contra aquéllos generados con base flexible, se observa de manera general, que los resultados promedios son muy similares entre sí. Sin embargo, se aprecia de la figura 8.37 que las distorsiones se amplifican para la condición máxima registrada, la cual fue para la dirección y del caso B con los registros de aceleración EO30. La respuesta con base flexible es un 27% mayor en la azotea para la condición de servicio, y un 13% mayor en el entrepiso dos para la condición última, comparándolas contra las respuestas en dichos entrepisos con base rígida. Además, se aprecia que se tienen graficados los dos casos para los registros EO30, donde se observa que fue el caso A el cual generó las máximas distorsiones para la dirección x, y el caso B que hizo lo respectivo para la dirección y (figura 8.37).

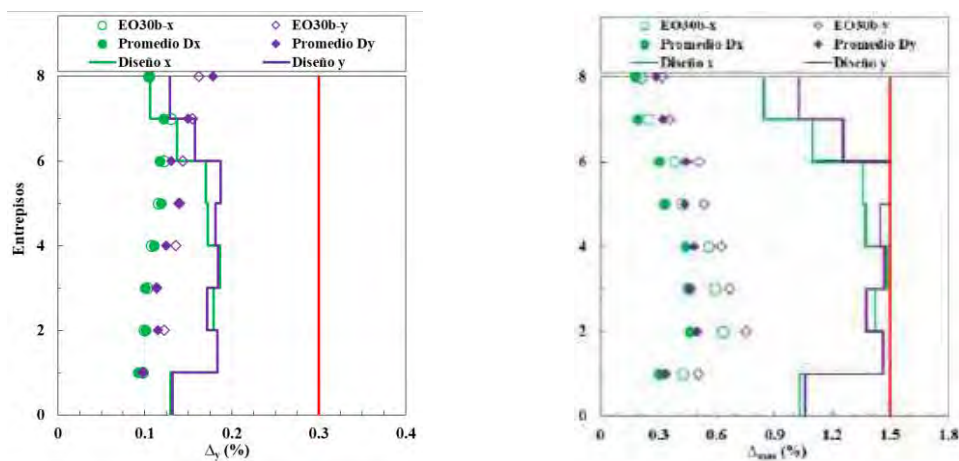


Figura 8.36. Distorsiones de fluencia y máximas, modelo de ocho niveles con base rígida

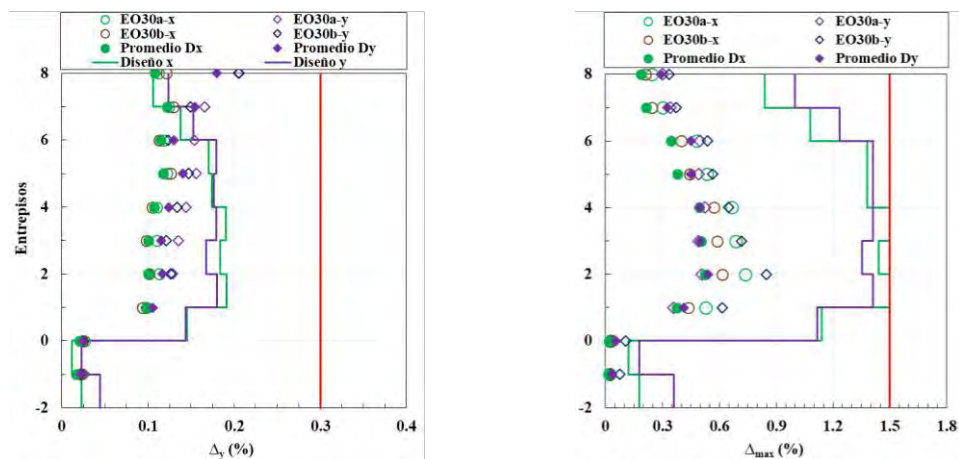


Figura 8.37. Distorsiones de fluencia y máximas, modelo de ocho niveles con base flexible

En la figura 8.38 se resume la respuesta global que desarrolla la estructura de ocho entrepisos con base rígida con el registro de aceleración EO30 para el caso B. Se aprecia de éstas que en la dirección y se genera hasta un 16% más cortante que en la dirección x. Sin embargo, las demandas de ductilidad que se desarrollan para cada dirección de análisis son muy similares para cada entrepiso evaluado, con excepción del entrepiso seis y siete. De la misma manera, analizando las sobrerresistencias que cada entrepiso desarrolla, se aprecia que ésta se

encuentra entre los valores de $1.5 < V_y/V_{\max} < 3.0$. Evaluando la respuesta promedio que los ocho pares de registros de aceleración producen al edificio de ocho entrepisos con base rígida (figura 8.38), se observa que las demandas de cortante se reducen en un 70% aproximadamente en comparación con la respuesta máxima producida, aunque la dirección y sigue desarrollando los mayores valores de V/W_T . Por otra parte, se observa también que las demandas de ductilidad por entrepiso se reducen en la respuesta promedio; no obstante, se aprecia un aumento en la relación V_y/V_{\max} en algunos entrepisos superiores en la dirección y (figura 8.38).

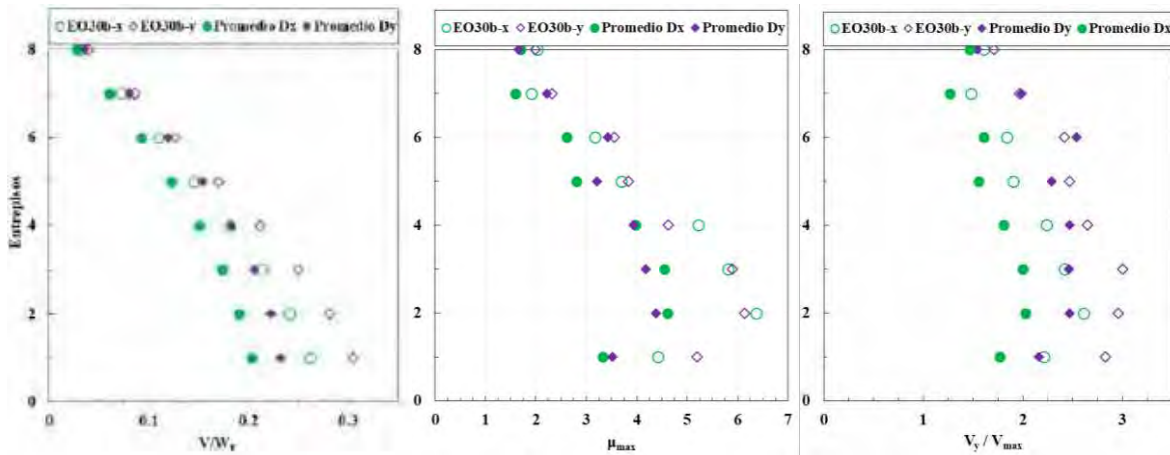


Figura 8.38. Resumen de la respuesta global, modelo de ocho niveles con base rígida

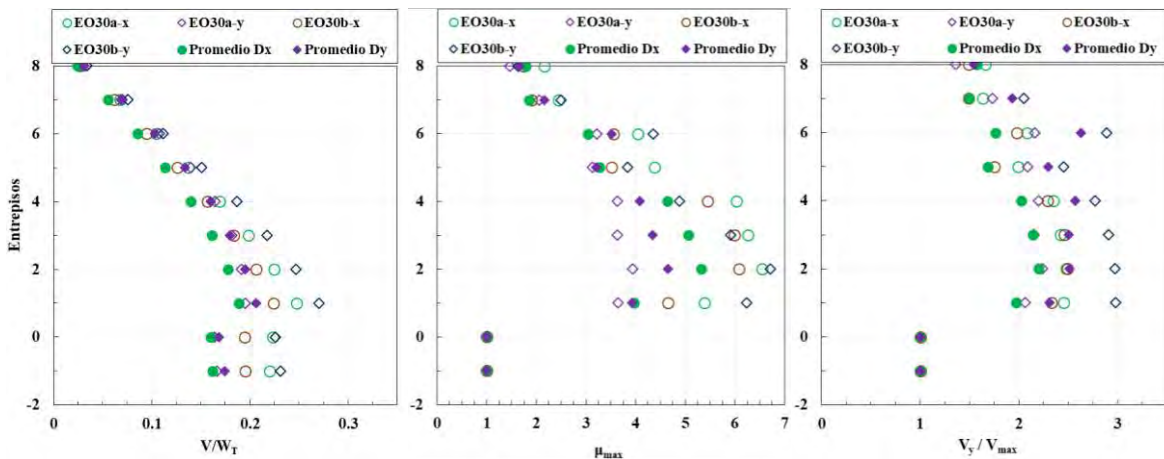


Figura 8.39. Resumen de la respuesta global, modelo de ocho niveles con base flexible

En la figura 8.39 se presenta, a manera de gráficas, la respuesta global que desarrolla el modelo de ocho entrepisos con base flexible. Los cortantes promedios que desarrolla cada entrepiso son muy similares, si se compara con los obtenidos modelando la base del mismo edificio como rígida. Por lo tanto, las demandas de sobrerresistencia (V_y/V_{\max}) son muy similares entre sí también, aunque se observa una ligera amplificación para el entrepiso seis. Por otra parte, se aprecia que las ductilidades promedios por entrepiso se amplifican tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura, sobre todo para la dirección x, donde se desarrollan ductilidades mayores a cinco. Este valor se amplifica hasta 6.71 veces en el

entrepiso dos, con la consideración del caso B de los registros de aceleración EO30 en la dirección y . Aunque de manera general, los valores de ductilidades que se desarrollan en cada entrepiso son mayores con la consideración máxima, se presentan ciertas particularidades, como el del caso A en la dirección x , donde ésta es menor que los valores promedios obtenidos en la misma dirección. Finalmente, se observa que los entrepisos de los sótanos se obtienen valores de 1.0 para las ductilidades máximas (μ_{max}) y de sobrerresistencia, debido a que éstos se comportan de manera elástica (figura 8.39)

En la figura 8.40 se resume la respuesta asociada a los ciclos inelásticos que el edificio de ocho entrepisos con base rígida genera. De manera general, se observa que del total de ciclos histeréticos que se producen por efecto del registro EO30 caso B, entre el 20% al 60%, son del tipo inelástico para la dirección x , mientras que entre el 30% al 80%, lo son para la dirección y . Aunque evaluando la respuesta promedio, se aprecia que en la dirección y se generan más ciclos inelásticos para todos los entrepisos (figura 8.40). Analizando las relaciones $K_{min}/K_{elástica}$ y $K_{prom}/K_{elástica}$, se observa que tanto para la respuesta promedio como para la máxima registrada, los valores de la dirección x son menores que los que se desarrollan en su dirección ortogonal. Para cada una de éstas, se observa que los valores mínimos se desarrollan en los entrepisos dos y tres, que son donde se desarrollan las mayores ductilidades locales de los disipadores de energía (ADAS y BRBs). Caso contrario sucede con el último par de entrepisos, donde dichos valores evaluados son más cercanos a uno, es decir, a pesar que se presentan un alto número de ciclos inelásticos, no se presenta gran pérdida de rigidez de entrepiso, consecuencia principal de que la participación no lineal es prácticamente exclusiva de los disipadores de energía (figuras 8.40). Como era de esperarse, por su definiciones, se aprecia que los valores de K_{min} son menores a las de K_{prom} , ambas normalizadas con la rigidez elástica, debido a que la rigidez secante mínima (K_{min}) es la más demandada para el medio ciclo y, por ello, normalmente se obtienen diferencias significativas del 80% con respecto a la promedio (K_{prom}), que es más representativa de la rigidez de medio ciclo promedio degradada (figura 8.6). Cabe señalar que la rigidez promedio (K_{prom}) de cada entrepiso en cada dirección es superior al 60% de la rigidez elástica en la dirección x y del 75% en la dirección y .

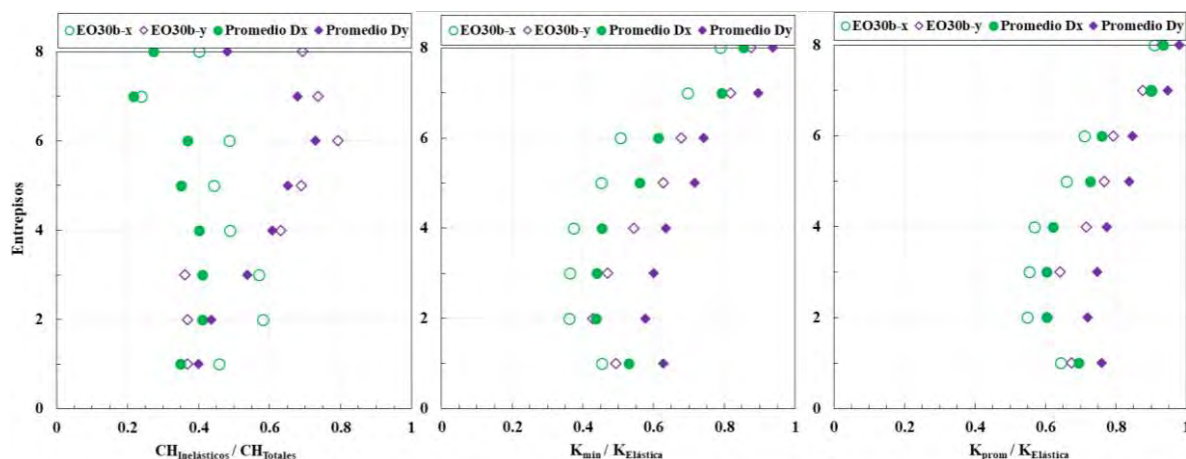


Figura 8.40. Resumen de los ciclos inelásticos para el modelo de ocho niveles con base rígida

A partir de los resultados promedios del modelo con base flexible (figura 8.41), se demuestra que se incrementan la cantidad de ciclos inelásticos cuando se toman en cuenta efectos de interacción suelo-estructura, es decir, que la relación $CH_{inelásticos} / CH_{totales}$ es mayor, sobre todo en la dirección y. Sin embargo, si se evalúa la respuesta máxima que se obtiene con el caso B de los registros EO30, se observa que dichos valores disminuyen con el modelo de base flexible en comparación con las de base rígida. Por otra parte, no se aprecian diferencias significativas de la rigidez secante mínima ni de la rigidez promedio, con las diferencias de modelado de la base de los edificios, aunque se aprecia que las menores magnitudes de la relación $K_{prom}/K_{elástica}$ se obtienen en la dirección x, cuando se inducen los registros EO30 para el caso A, desarrollando un valor mínimo de 0.5 en el entrepiso dos, que es el entrepiso donde los dispositivos ADAS desarrollan la máxima ductilidad local (figura 8.19).

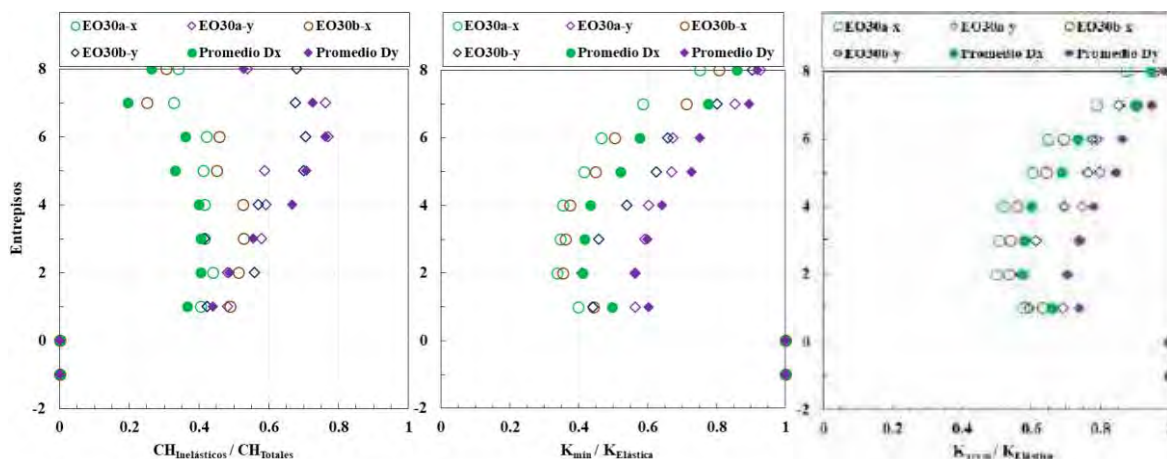


Figura 8.41. Resumen de los ciclos inelásticos para el modelo de ocho niveles con base flexible

En la figura 8.42 se presentan las relaciones de distorsiones residuales para la respuesta máxima y la respuesta promedio del edificio de ocho entrepisos con base rígida. De manera general, se aprecia de éstas que la magnitud de distorsión residual máxima es menor al 0.025% para la respuesta máxima (d_r), e incluso dicho valor se reduce a menos del 0.005% para la respuesta promedio. Esto quiere decir que después del evento sísmico la estructura exhibe una deformación lateral permanente imperceptible, lo cual es lógico, si se observan los mapeos de fluencias inelásticos máximos (figuras 8.13 y 8.14), donde los que desarrollan la mayor parte de la no linealidad son los disipadores de energía y algunas vigas desarrollan fluencias incipientes menores (figura 8.17). Dichas distorsiones residuales representan menos del 10% de la distorsión máxima de descarga justo cuando sucede la distorsión máxima absoluta para cada medio ciclo para la respuesta promedio, aunque dicha relación de distorsiones se amplifica cuando se evalúa la respuesta ante los registros EO30 con el caso B, para los dos últimos entrepisos en la dirección y (figura 8.42). Finalmente, la relación entre la distorsión residual y la distorsión máxima son menores del 0.009% en la respuesta promedio de la estructura, incluso cuando este valor aumenta hasta el 0.036% para la respuesta máxima (figura 8.42), dicha deformación residual permanente no representaría una amenaza para la operatividad del inmueble, por lo que se confirma que el diseño es resiliente, al garantizar una operación completa después de la acción de un sismo intenso.

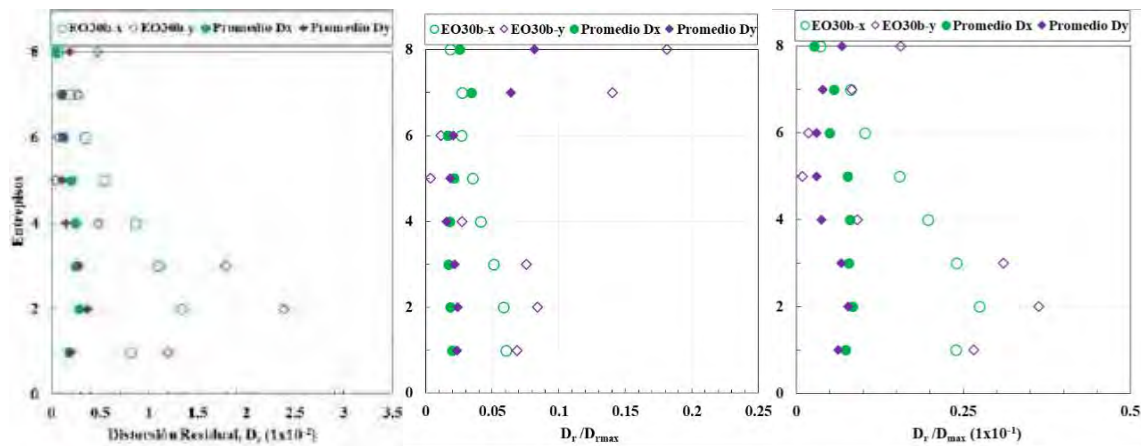


Figura 8.42. Distorsiones residuales absolutas y normalizadas máximas, modelo de ocho niveles y base rígida

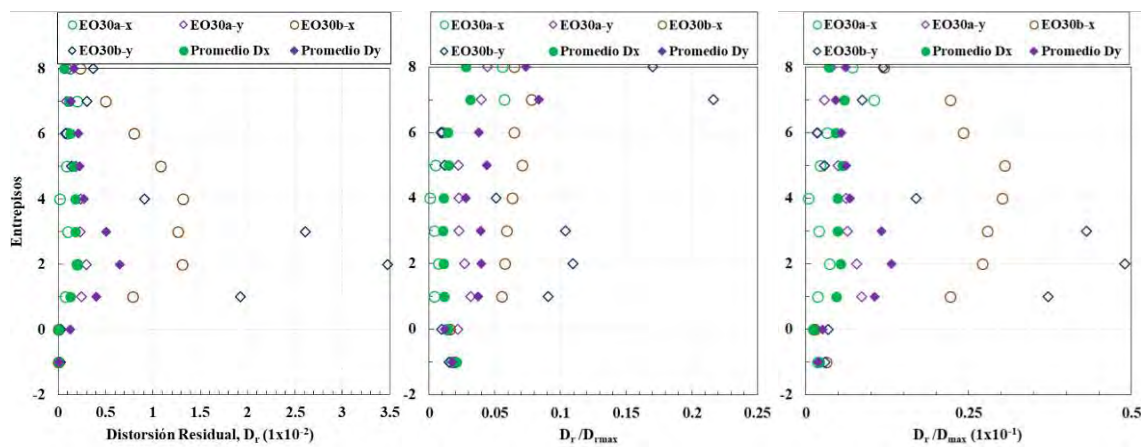


Figura 8.43. Distorsiones residuales absolutas y normalizadas máximas, modelo de ocho niveles y base flexible

Se aprecia de manera general que modelar la base de los edificios como flexible amplifica la respuesta residual de éstos. Se aprecia que los mayores valores de distorsión residual, para ambas direcciones de análisis, se obtuvieron con el caso B del acelerograma EO30, caso donde se presentan las ductilidades locales máximas para los BRBs; sin embargo, cuando se evalúa el caso A del mismo, se observa que las distorsiones residuales y sus respectivas relaciones con distorsiones máximas, son menores a la promedio (figura 8.43). Además, se aprecia que los valores promedios evaluados en las dos direcciones se amplifican ligeramente; no obstante, el mayor valor para la distorsión residual es un 45% más grande en el entrepiso dos, con la respuesta inducida por los registros de aceleración EO30 en su caso B (figura 8.43). Asimismo, la relaciones $d_r/d_{r,max}$ y d_r/d_{max} sufren también ampliificaciones del 54% y 35% en el entrepiso siete y dos respectivamente, con el mismo par de registros de aceleración. Es importante mencionar que a pesar que existen ampliificaciones tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura en los modelos, estos valores siguen sin representar un problema para el funcionamiento del inmueble después de un evento sísmico importante, debido a que la gran parte de la no linealidad se concentraría en los dispositivos de disipación de energía, los cuales pueden reemplazarse de manera eficiente, incluyendo un programa de reemplazo que no afecte la operación completa de la estructura o ésta se reduzca a lapsos de tiempo muy tolerables por los dueños y/o usuarios del inmueble.

8.5 Modelos de 15 entrespisos

A continuación se presentan los resultados máximos y promedios, obtenidos de los análisis dinámicos paso a paso no lineales, de los modelos con 15 entrespisos (figuras 8.44 a 8.88). Los registros de aceleración a los que se sometieron son representativos de la zona IIIa de la Ciudad de México, cuyas características principales se resumen en la tabla 8.2. Los resultados obtenidos por todos los pares de registros de aceleración inducidos a estos modelos se presentan en el apéndice G de este documento.

8.5.1 Base rígida

Se muestran los resultados del edificio de 15 entrespisos modelando su base como empotrada (figura 8.44). Las respuestas máximas para los dispositivos ADAS se presentan para los pares de registros de aceleración de la estación MI15 con el caso B. Las mayores ductilidades de los BRBs se obtienen con el evento registrado en el 2017 en la estación DX37 con el caso B también. En las figuras 8.45 a 8.48 se presentan los ciclos histeréticos que desarrollan los dispositivos ADAS y BRBs para los registros antes mencionados. Se observa de la figura 8.45 que todos los dispositivos ADAS están participando no linealmente, y en los entrespisos tres y cuatro se presentan las mayores ductilidades locales. Para el caso de los dispositivos BRBs, se observa que en los entrespisos cuatro al nueve, los disipadores desarrollan una ductilidad local de $\mu_d \geq 6$, aunque los dispositivos del último nivel permanecen elásticos (figura 8.48). Si se evalúa la respuesta de los dispositivos en la dirección ortogonal donde se presentan los casos máximos, se observan que tanto los dispositivos ADAS y BRBs desarrollan menos ciclos histeréticos, lo cual es más notorio para el caso de los BRBs con los registros de aceleración MI15 (figura 8.47).

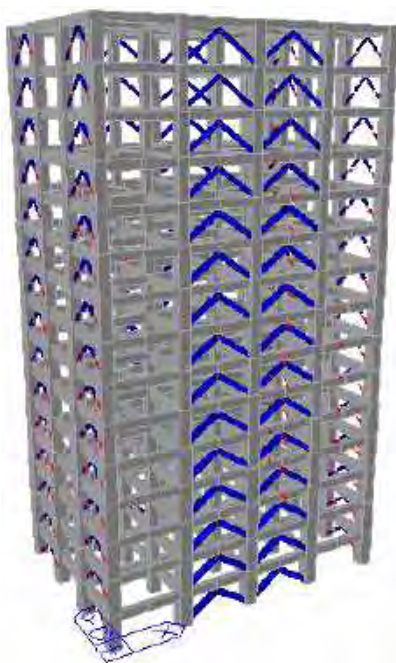


Figura 8.44. Modelo de 15 entrespisos con base rígida

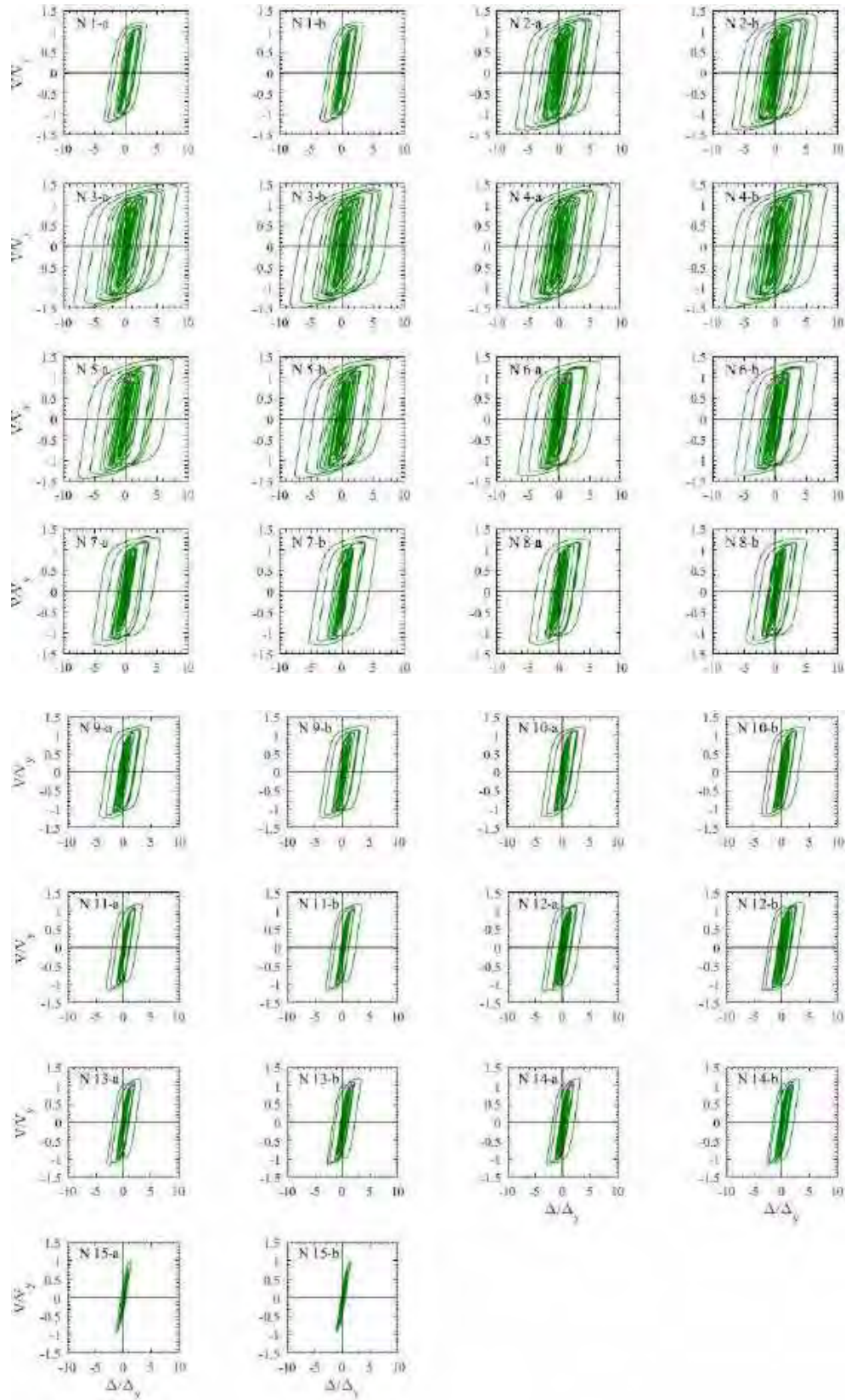


Figura 8.45. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, modelo de 15 entrepisos con base rígida, registros de aceleración MI15b

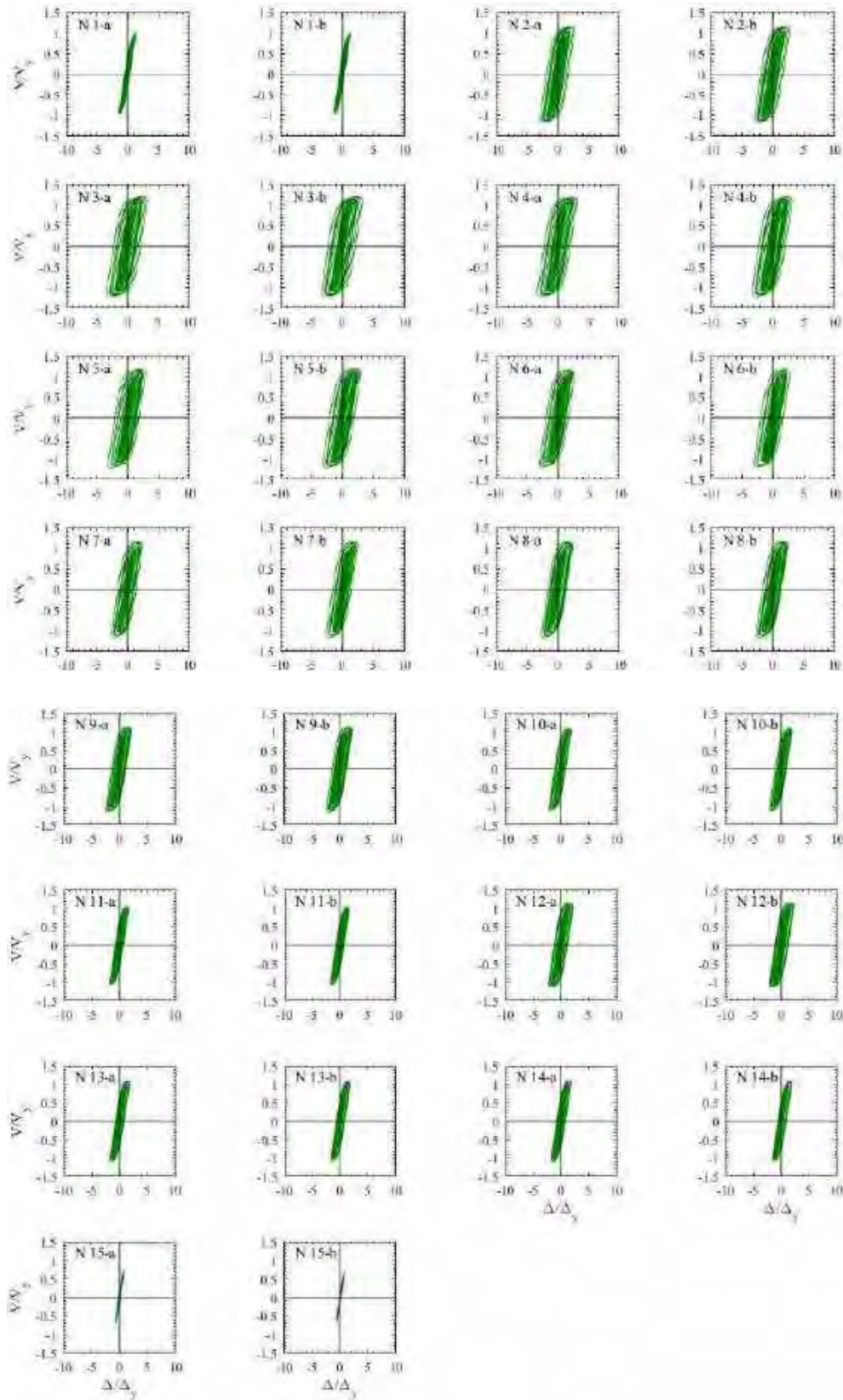
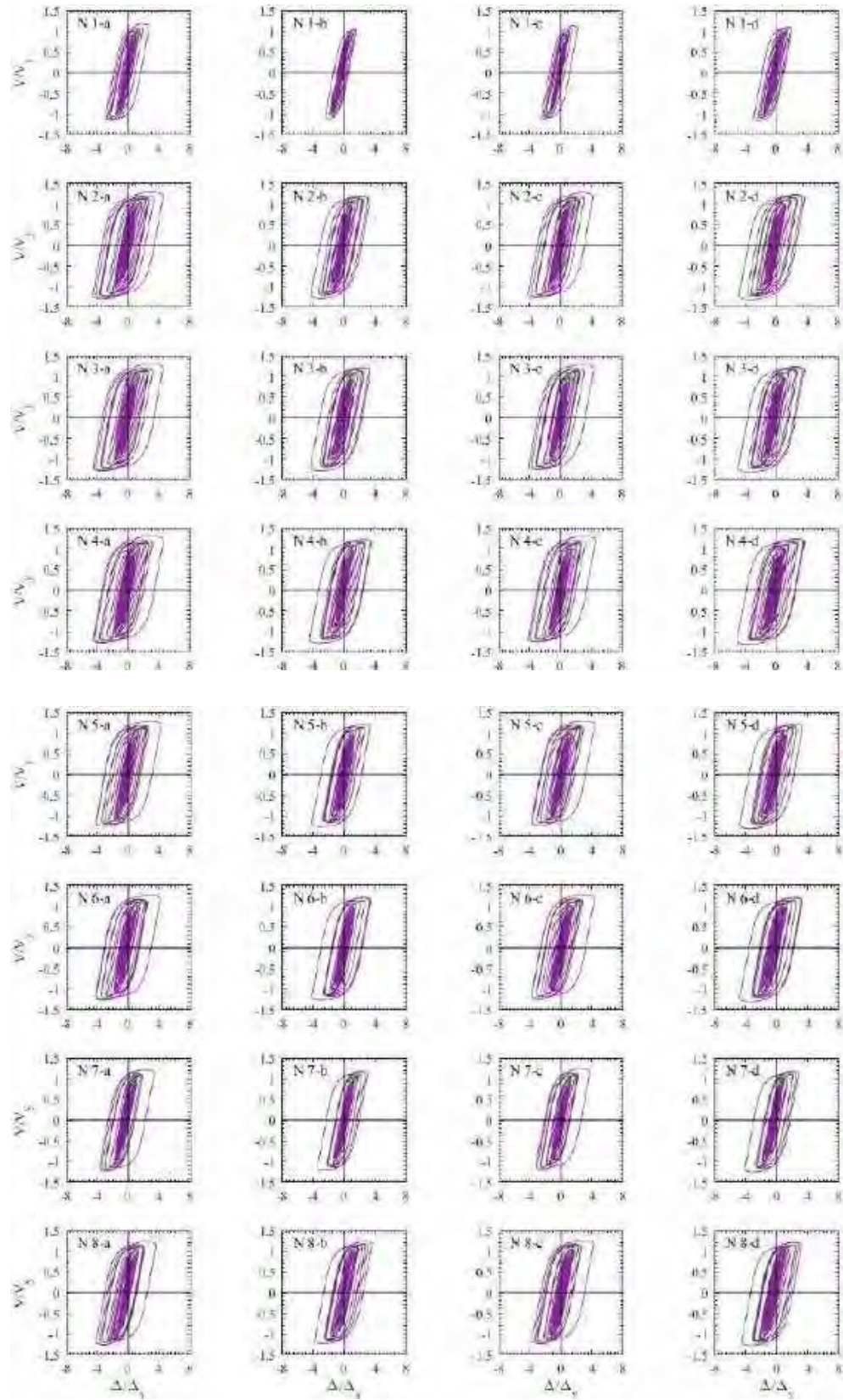


Figura 8.46. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, modelo de 15 entrepisos con base rígida, registros de aceleración DX37b (2017)



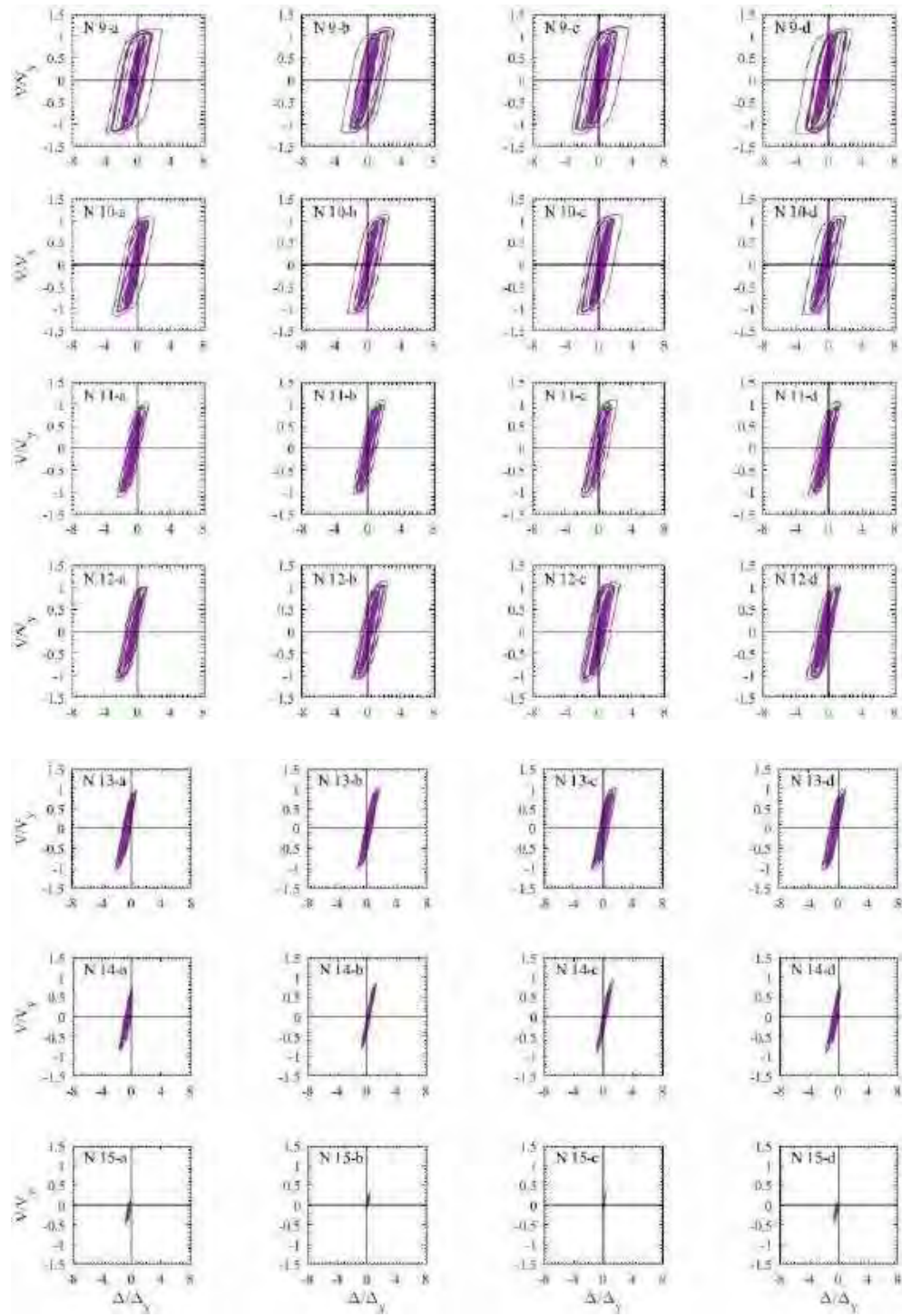
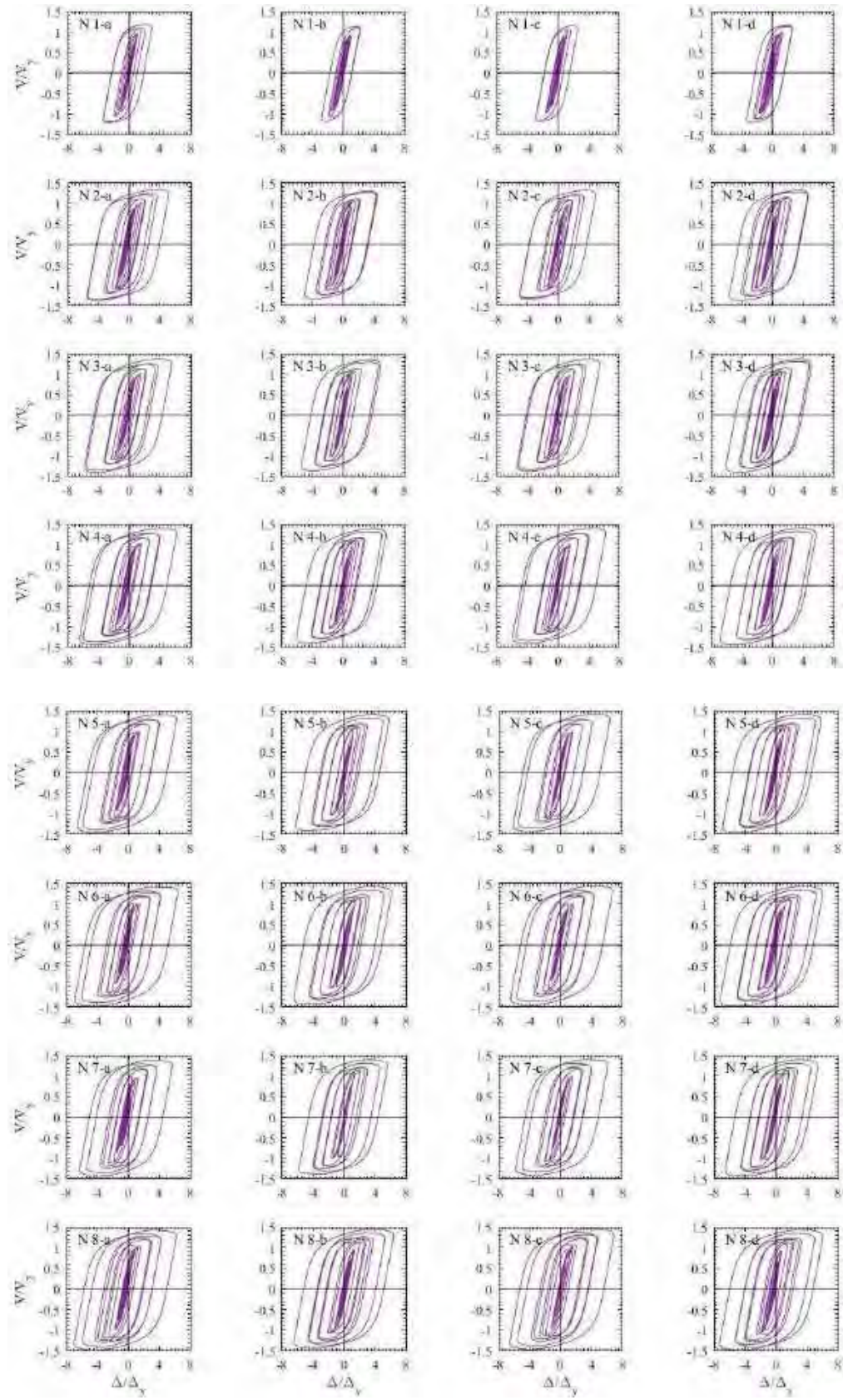


Figura 8.47. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, modelo de 15 entrespis con base rígida, registros de aceleración MI15b



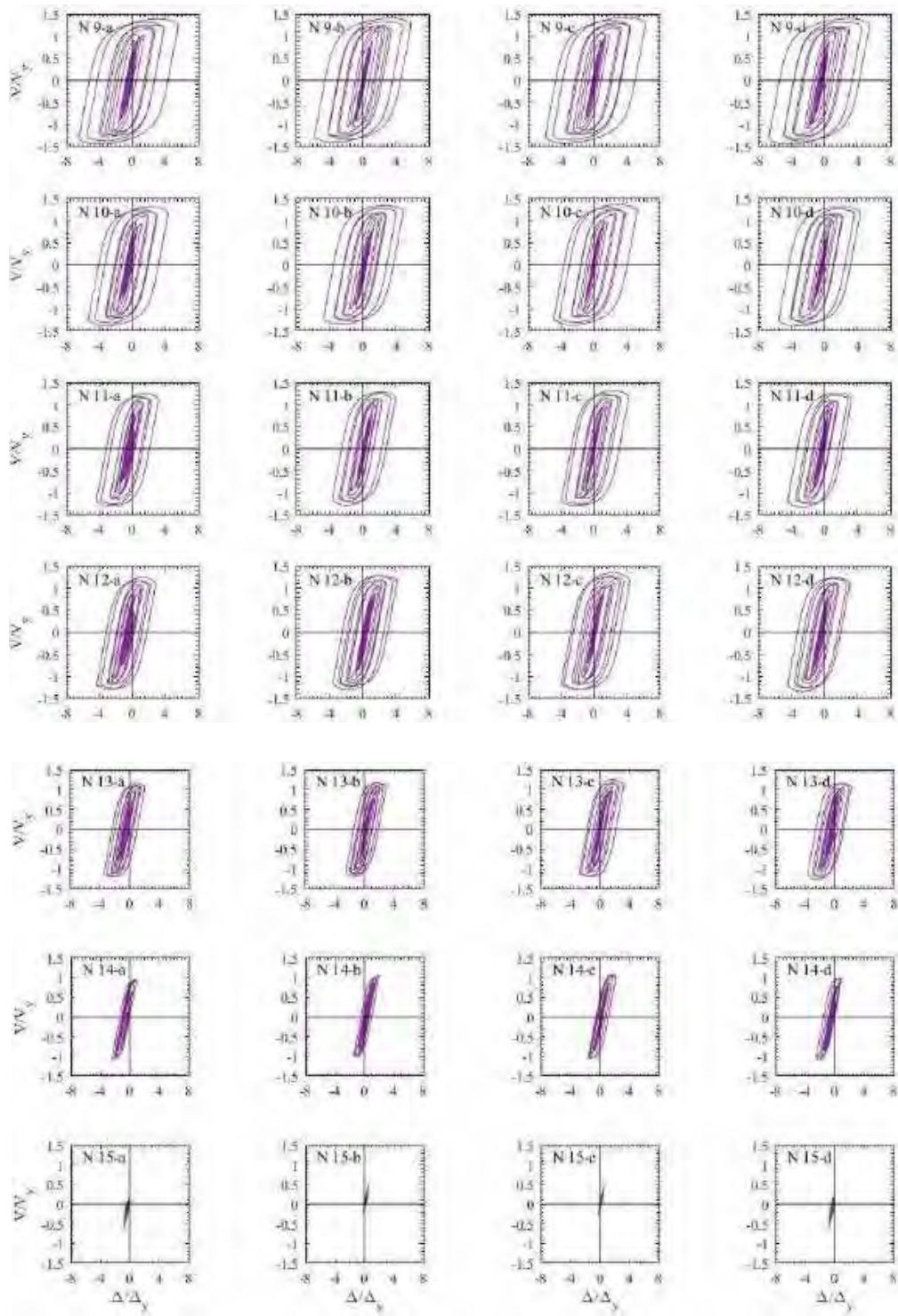


Figura 8.48. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, modelo de 15 entrespisos con base rígida, registros de aceleración DX37b (2017)

En las figuras 8.49 a 8.52 se presentan los ciclos histeréticos por entrepiso que se desarrollan en la dirección x y y para el modelo de 15 entrepisos con base rígida. De manera general, se observan que los ciclos histeréticos desarrollan mayores valores de fuerza cortante y de distorsiones con los registros MI15 para la dirección x y con los registros DX37 en la dirección y . También, es perceptible que de ambos registros antes mencionados y de las dos direcciones evaluadas, es en la dirección x con el registro MI15 donde se desarrollan más ciclos histeréticos que para los otros casos mencionados, donde los entrepisos uno a siete se presentan valores de $V/W_T \geq 0.25$ (figura 8.49).

Para los ciclos histeréticos que se desarrollan en la dirección y con los registros de aceleración DX37 (figura 8.52), se observa que se desarrollan menos ciclos inelásticos, a pesar que es en este caso donde los disipadores BRBs presentan los mayores valores de ductilidad local (figura 8.48). No obstante, en la mayoría de los entrepisos se obtienen mayores magnitudes de cortante que en la dirección x en su caso más desfavorable (figura 8.49), y en más cantidades de entrepisos se desarrollan valores de $V/W_T \geq 0.25$ (figura 8.52).

Para las direcciones ortogonales donde se presentan las demandas máximas, se aprecia poco o nulo comportamiento no lineal en cada entrepiso evaluado. De esta manera, se aprecia la respuesta en la dirección x con el registro de aceleración DX37, que pocos entrepisos desarrollan ciclos inelásticos, e incluso, algunos permanecen elásticos como en el caso del primer entrepiso (figura 8.60). Para la respuesta obtenida en la dirección y con los registros de aceleración MI15, se aprecia que a pesar que los cortantes que se desarrollan en cada entrepiso son de valores de magnitud similares a las demandas máximas, la cantidad de ciclos histeréticos inelásticos son reducidos, e incluso se observa comportamiento elástico para el primer y los últimos dos entrepisos (figura 8.61), a pesar que en el entrepiso 14 los BRBs presentan muy poco ductilidad local (figura 8.47).

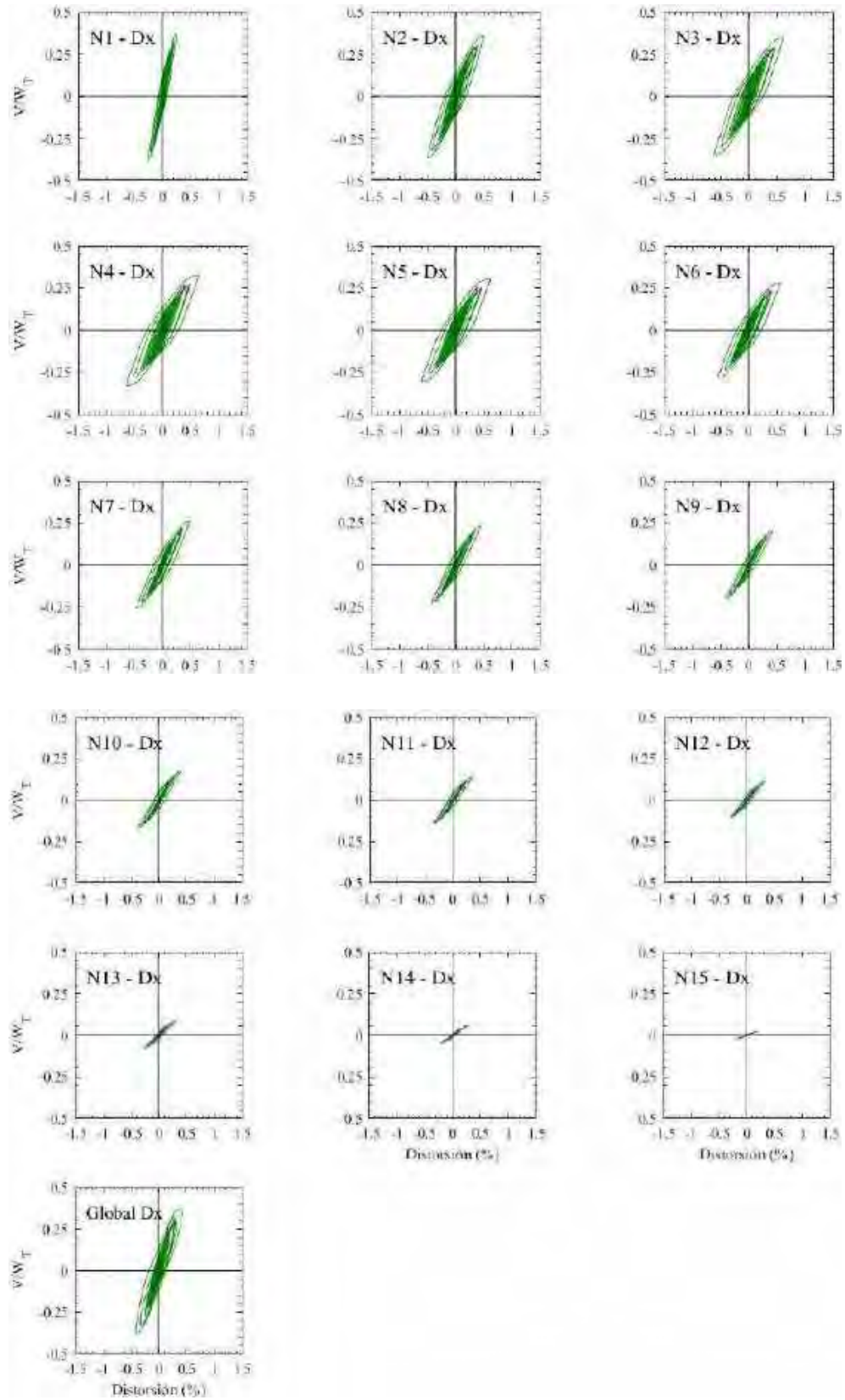


Figura 8.49. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración MI15b

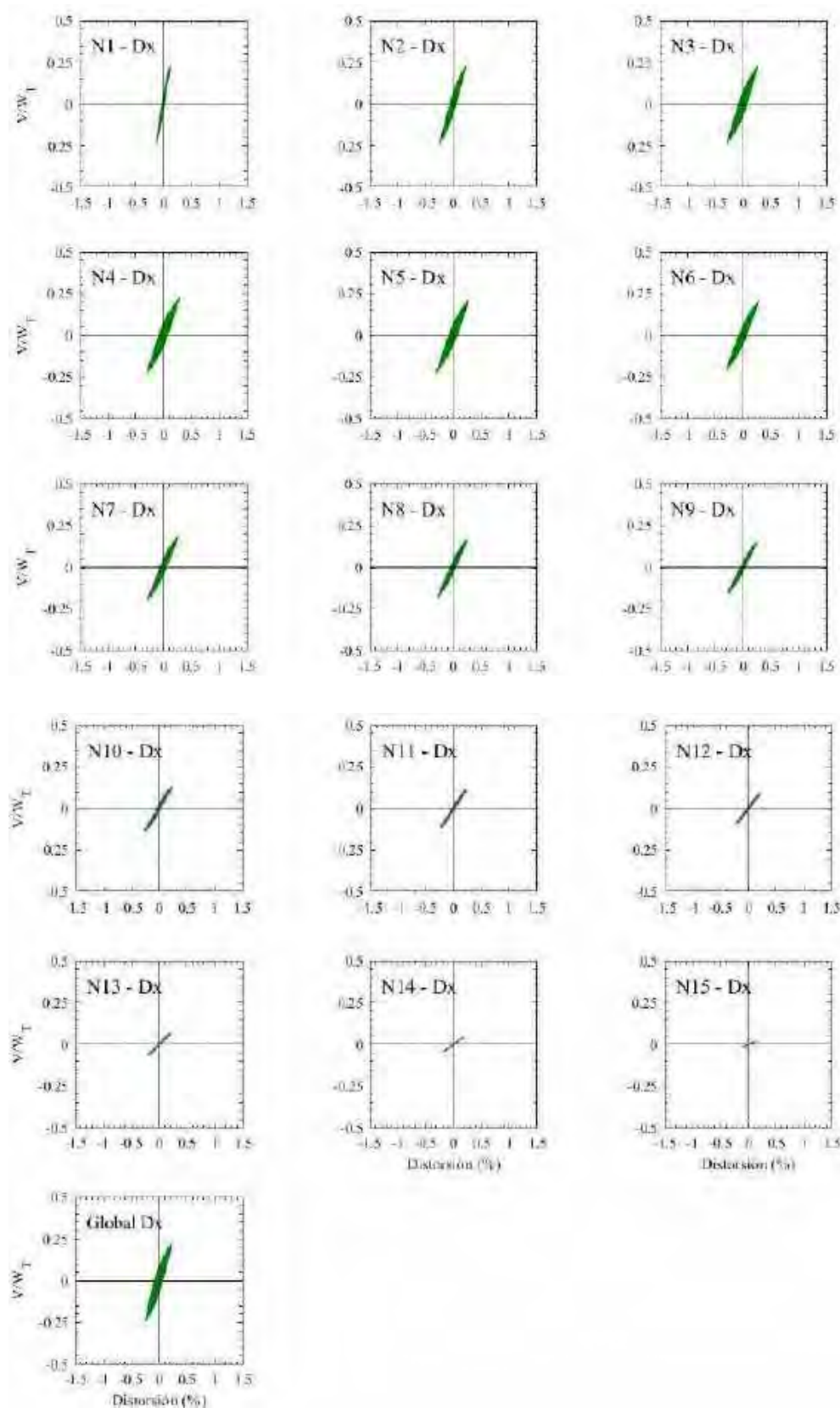


Figura 8.50. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración DX37b (2017)

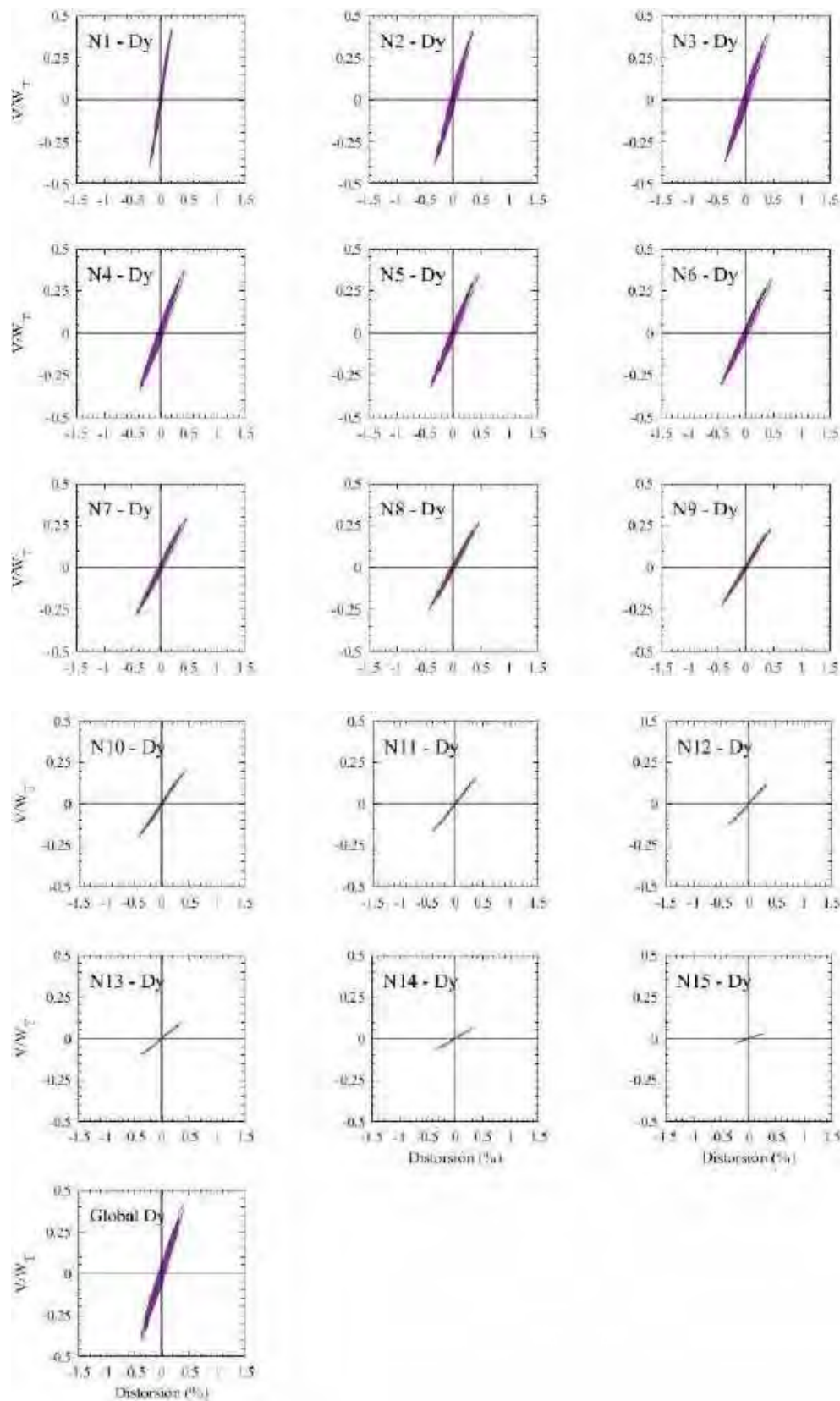


Figura 8.51. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración MI15b

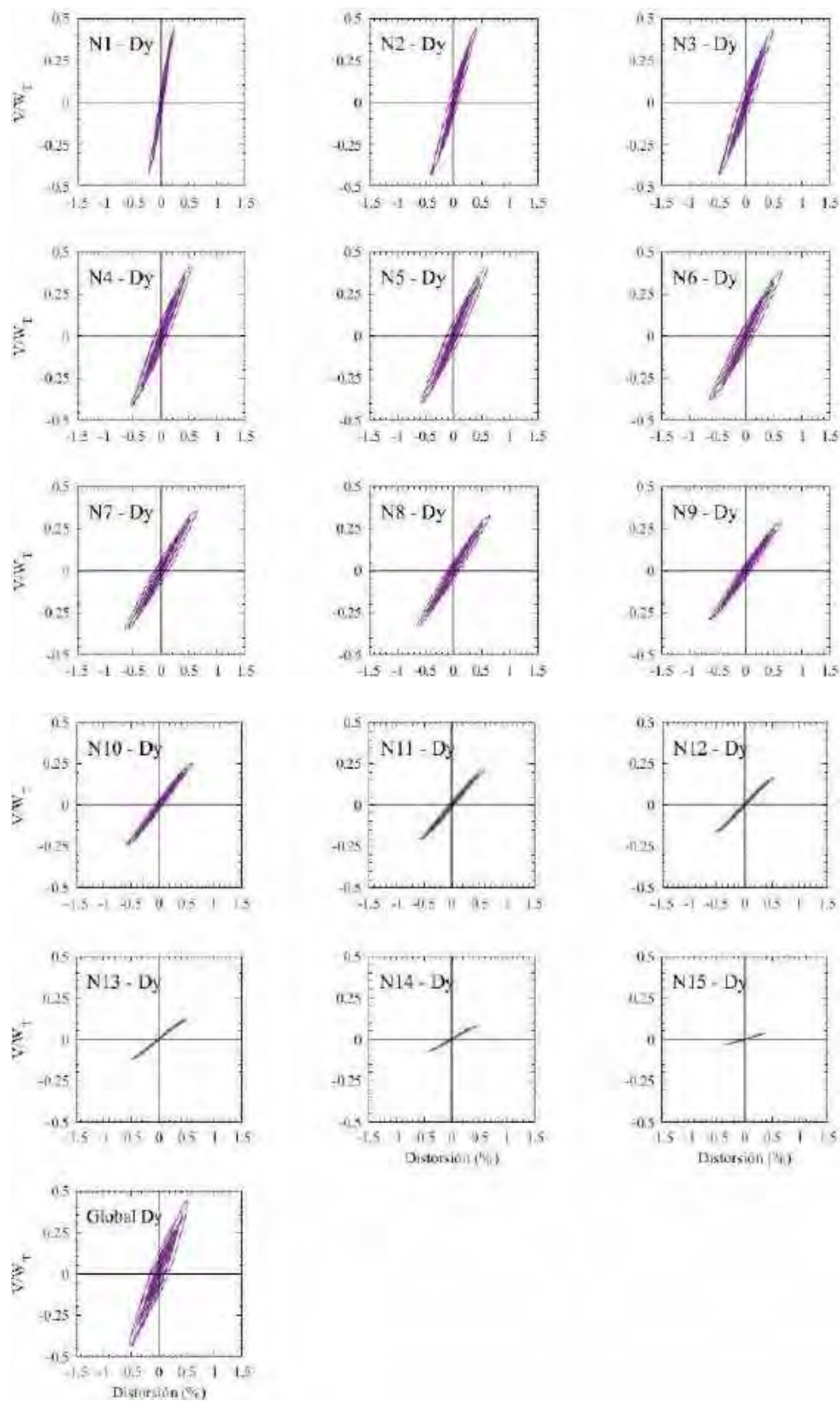
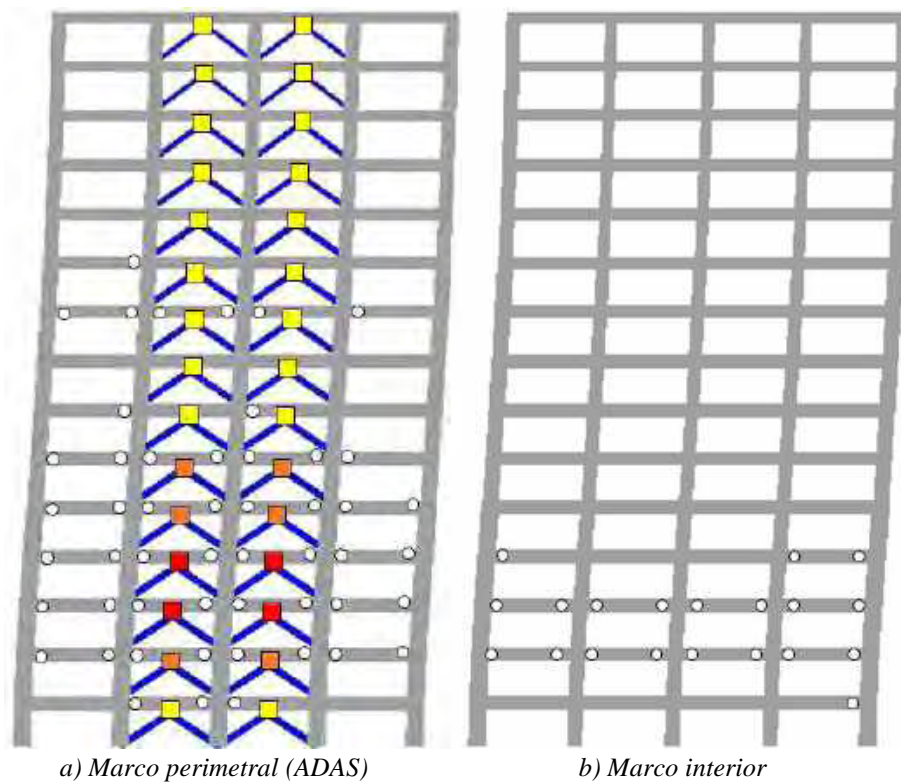


Figura 8.52. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración DX37b (2017)

En las figuras 8.53 a 8.56, se presentan los mapeos de fluencias inelásticas obtenidos con los registros de aceleración MI15 y DX37 para las dos direcciones de análisis. En la figura 8.53 se aprecia el comportamiento inelástico máximo para los disipadores ADAS, obtenido para la dirección x con los registros de aceleración MI15. Se observa que la mayor parte de la no linealidad la toman los disipadores de energía y las máximas ductilidades se presentan en los entrepisos tres y cuatro. Además, existe presencia de fluencias incipientes en algunas vigas del marco exterior, y la cantidad de éstas que participan de manera no lineal se reducen para el marco interior. En la figura 8.55 se presentan el mapeo de fluencias para la dirección y con los registros de aceleración MI15; a pesar que los BRBs no desarrollan su ductilidad máxima, la mayoría de los dispositivos fluyen, con excepción de aquéllos en el último entrepiso. De manera general, se observa un comportamiento estructural resiliente, dado que para ambas direcciones la mayoría de los disipadores tienen un comportamiento no lineal importante, sobre todo en la dirección x , con algunas vigas con fluencias incipiente del 5% de su rotación última.

Cuando se somete al edificio a los registros de aceleración DX37, se observa un comportamiento ideal en la dirección x , dado que todos los elementos del marco y los contravientos de soporte permanecen elásticos, mientras que todos los disipadores desarrollan una fluencia de $\mu_d \leq 6$ (figura 8.54). Con los registros DX37, los dispositivos BRB desarrollan la ductilidad local máxima en el edificio de 15 entrepisos con base rígida. Se observa de la figura 8.56 que en los entrepisos cuatro a nueve, dichos elementos desarrollan ductilidades $\mu_d \geq 6$; sin embargo, las vigas presentan mayores magnitudes de rotación en comparación con los otros mapeos de fluencia evaluados en esta sección. Para los marcos exteriores, se observa que las vigas de la crujía intermedia desarrollan fluencias del 10% de la rotación última, mientras que para los marcos interiores disminuye dicho nivel de fluencia (figura 8.56b).

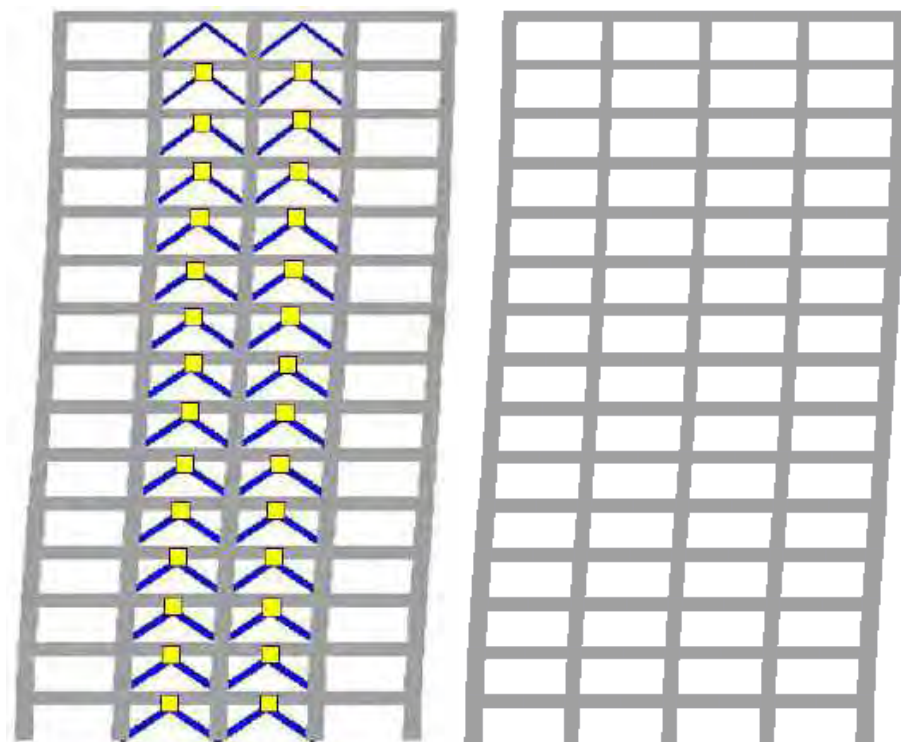
En las figuras 8.57 a 8.60 se presentan los mapeos de fluencias inelásticas residuales de los modelos de 15 entrepisos con base rígida. Se aprecia de éstas un comportamiento similar al de los modelos con ocho entrepisos, donde en la dirección x , no se ve un cambio significativo en el código de colores para la representación de fluencia para vigas. Sin embargo, se aprecia que los disipadores se quedan con una deformación residual de pequeñas magnitudes, e incluso, en algunos casos dicha representación desaparece (figura 8.58). En cambio, en la dirección y se observa que pocos elementos quedan con una rotación residual permanente, sobre todo en los marcos interiores. Asimismo, para todos los casos, las rotaciones residuales máximas en las vigas no son mayores al 5% de la rotación última de dichos elementos, a pesar que se presentan fluencias inelásticas máximas de mayor magnitud (figura 8.60).



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

Figura 8.53. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección x , para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración MI15b



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

Figura 8.54. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección x , para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración DX37b (2017)

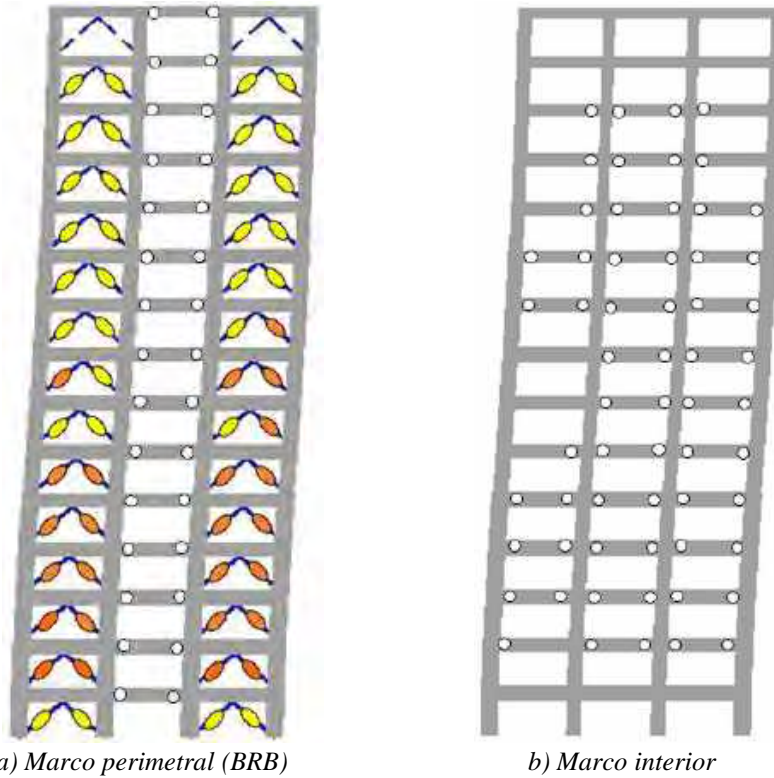


Figura 8.55. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección y, para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración MI15b

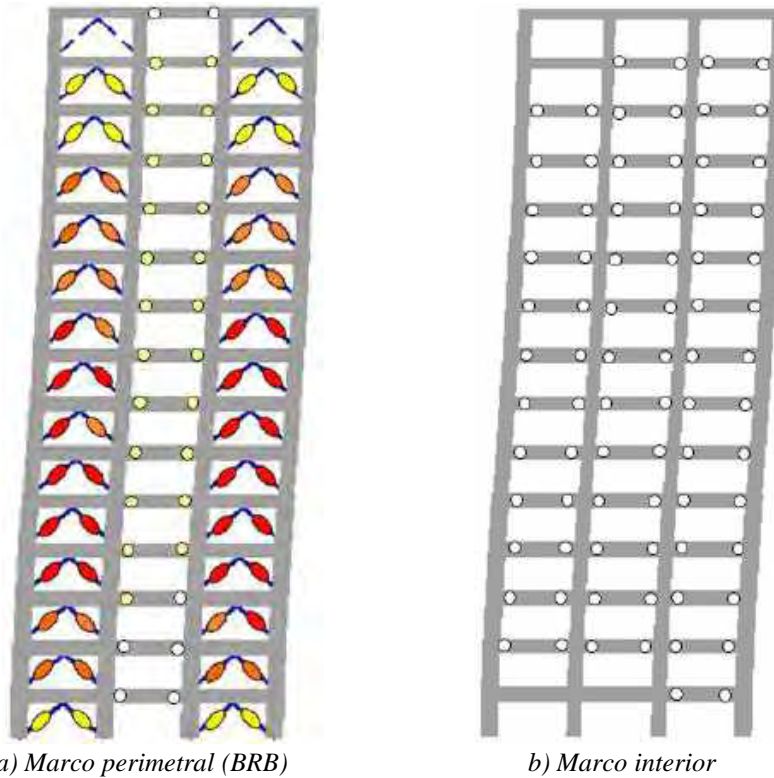


Figura 8.56. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección y, para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración DX37b (2017)

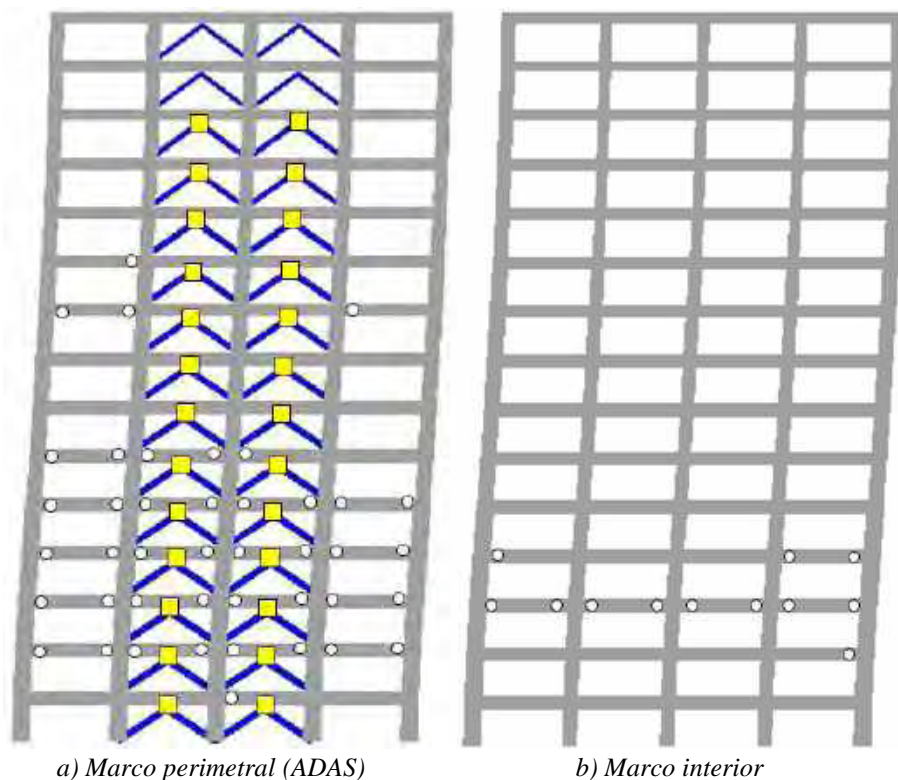


Figura 8.57. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección x , para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración MI15b

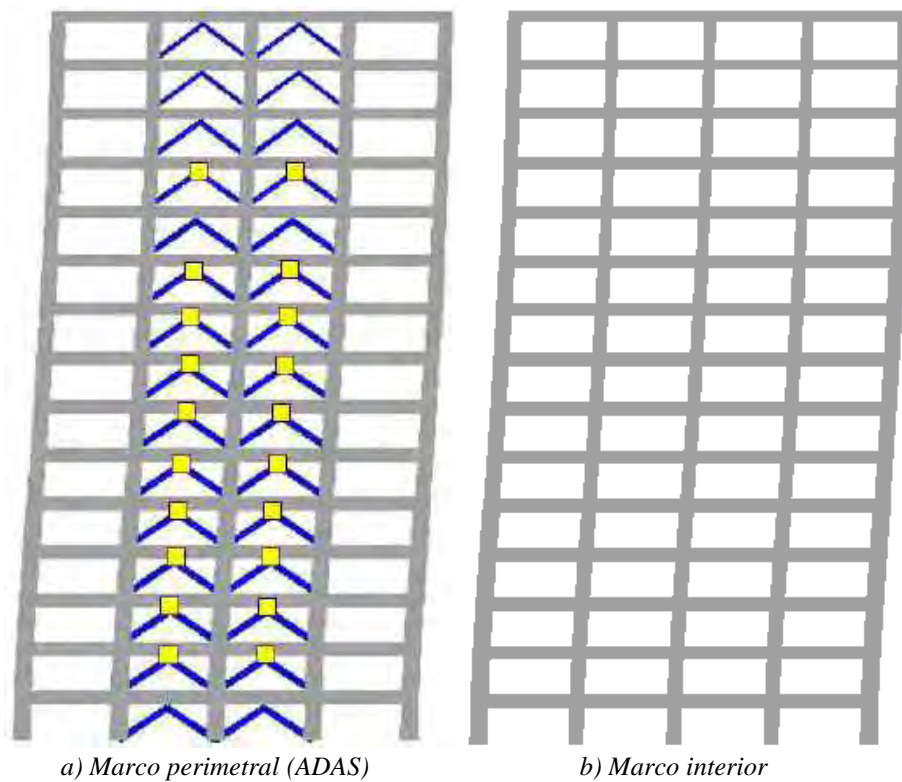
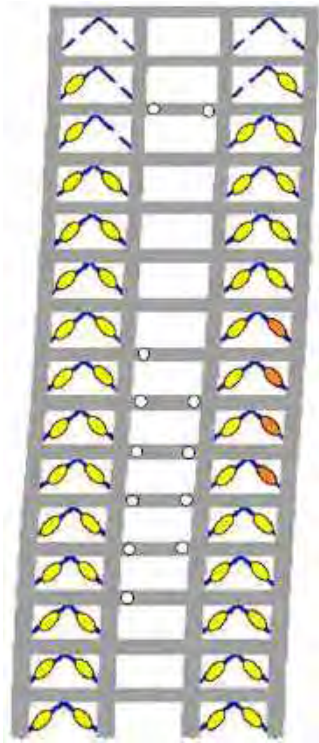
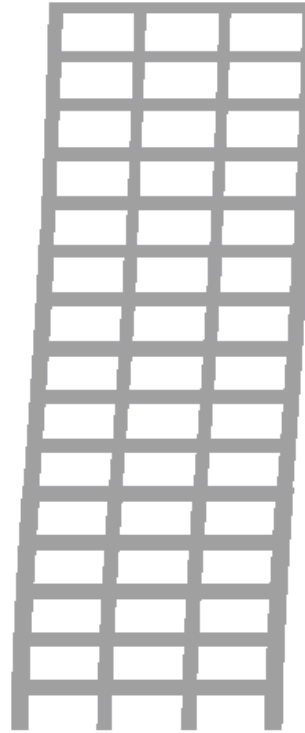


Figura 8.58. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección x , para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración DX37b (2017)

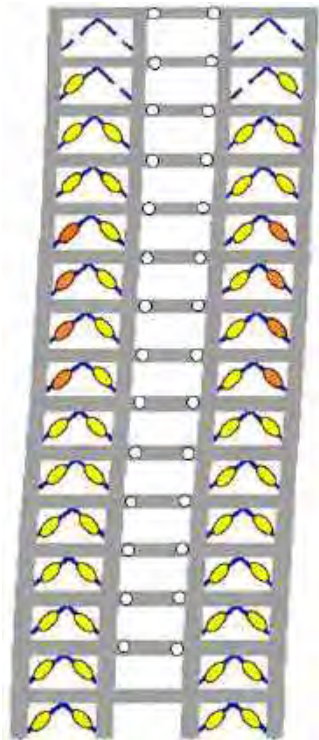


a) Marco perimetral (BRB)



b) Marco interior

Figura 8.59. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección y, para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración MI15b



a) Marco perimetral (BRB)



b) Marco interior

Figura 8.60. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección y, para el modelo de 15 niveles con base rígida, registros de aceleración DX37b (2017)

En la figura 8.61 se presentan los ciclos histeréticos que desarrollan las vigas con los mayores valores de rotación, cuando los disipadores de energía alcanzan sus ductilidades máximas. De esta manera, se grafica el comportamiento bilineal idealizado del elemento en cuestión, para conceptualizar la no linealidad que se genera, con los registros de aceleración inducidos al modelo de 15 entrepisos con base rígida. Se aprecia de éstas que las vigas de los primeros entrepisos presentan los mayores valores de rotación con los registros de aceleración MI15 (V1x), mientras que para las vigas en dirección y, el comportamiento máximo se presenta con los registro de aceleración DX37 para las vigas de los últimos entrepisos (V3y). A pesar que existe un cambio en el código de colores, que representa el comportamiento no lineal de las vigas en las dos direcciones de análisis, el valor máximo de la rotación para la viga V3y es un 13% mayor que para el máximo valor de rotación en las vigas de la dirección x (figura 8.61).

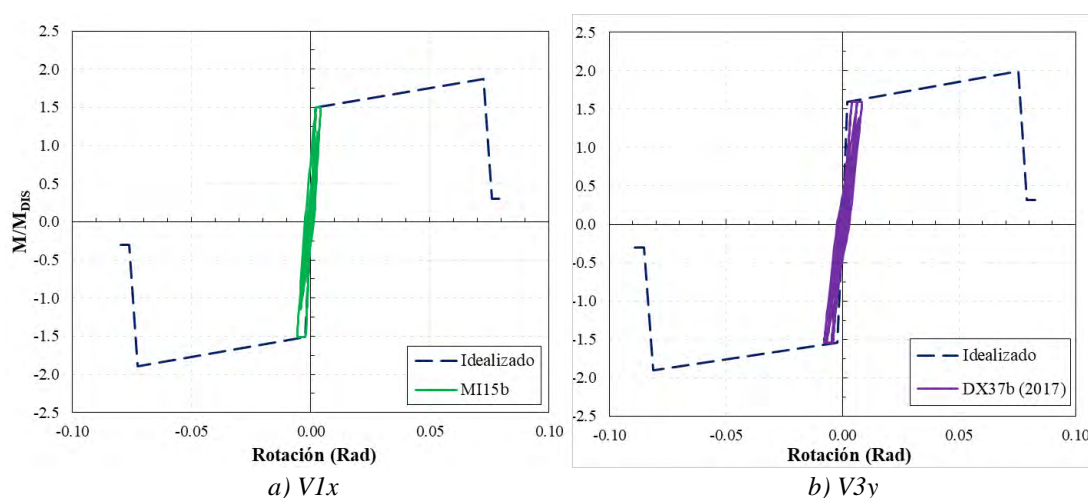


Figura 8.61. Máximas rotaciones en vigas para el edificio de 15 entrepisos con base rígida

8.5.2 Base flexible

A continuación se presentan los resultados del edificio de 15 entresijos tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura y modelando tres niveles de sótano (figura 8.62). Las respuestas máximas para los dispositivos ADAS y BRBs se presentan para los pares de registros de aceleración denominados como MI15 con el caso B y A respectivamente. En las figuras 8.63 y 8.64 se presentan los ciclos histéricos que desarrollan los dispositivos ADAS para el caso A y B de los registros de aceleración MI15. Se observa para ambos casos que en los entresijos dos a seis, los dispositivos ADAS generan gran cantidad de ciclos histéricos inelásticos, aunque los mayores valores se presentan para el caso B ($\mu_d \geq 10$) e incluso en algunos entresijos sobrepasan los límites impuestos en las gráficas lo que representaría la falla de dichos dispositivos (figura 8.64).

Para el caso de los dispositivos BRB, se observa que tanto para los casos A y B, estos elementos presentan también gran cantidad de ciclos histéricos inelásticos; no obstante, es en el caso A donde una mayor cantidad de dispositivos alcanzan su ductilidad última, especialmente de los entresijos dos a ocho (figura 8.65). A pesar que los BRBs exhiben un excelente comportamiento no lineal, algunos dispositivos del último entresijo permanecen elásticos durante toda la excitación sísmica inducida a los modelos con base flexible.

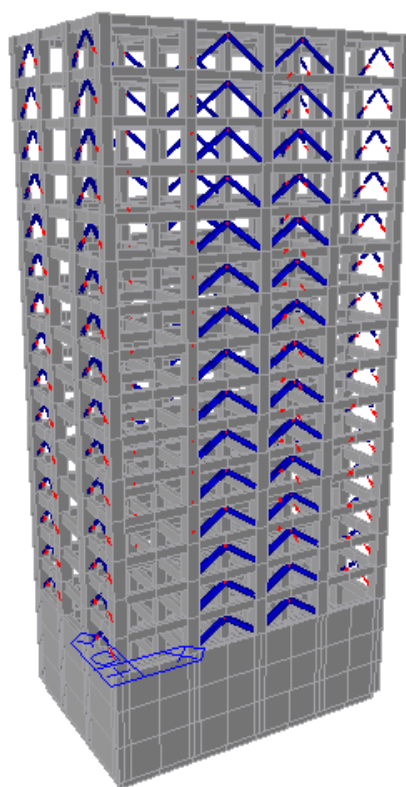


Figura 8.62. Modelo de 15 entresijos con base flexible

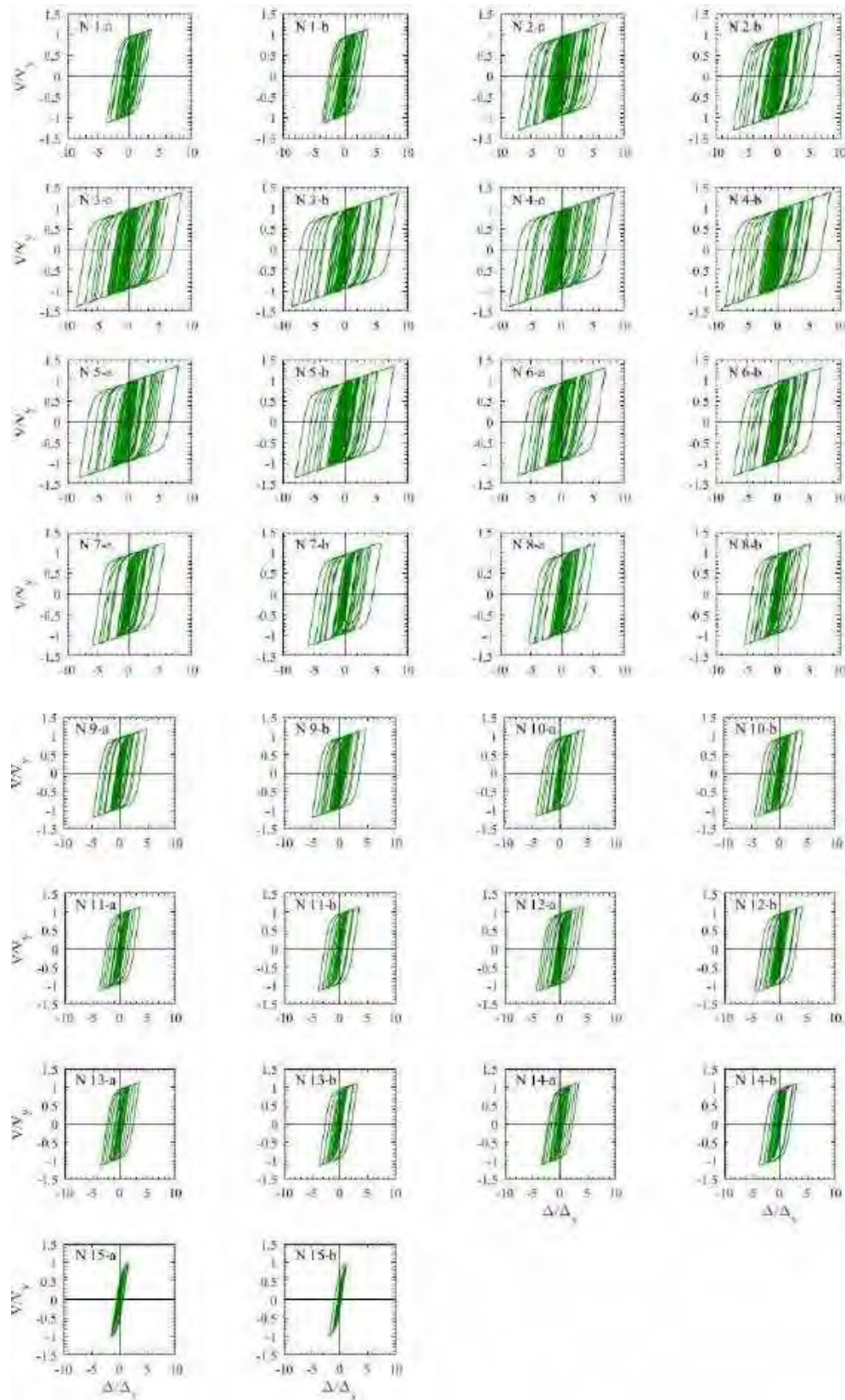


Figura 8.63. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, modelo de 15 entrepisos con base flexible, registros de aceleración MI15a

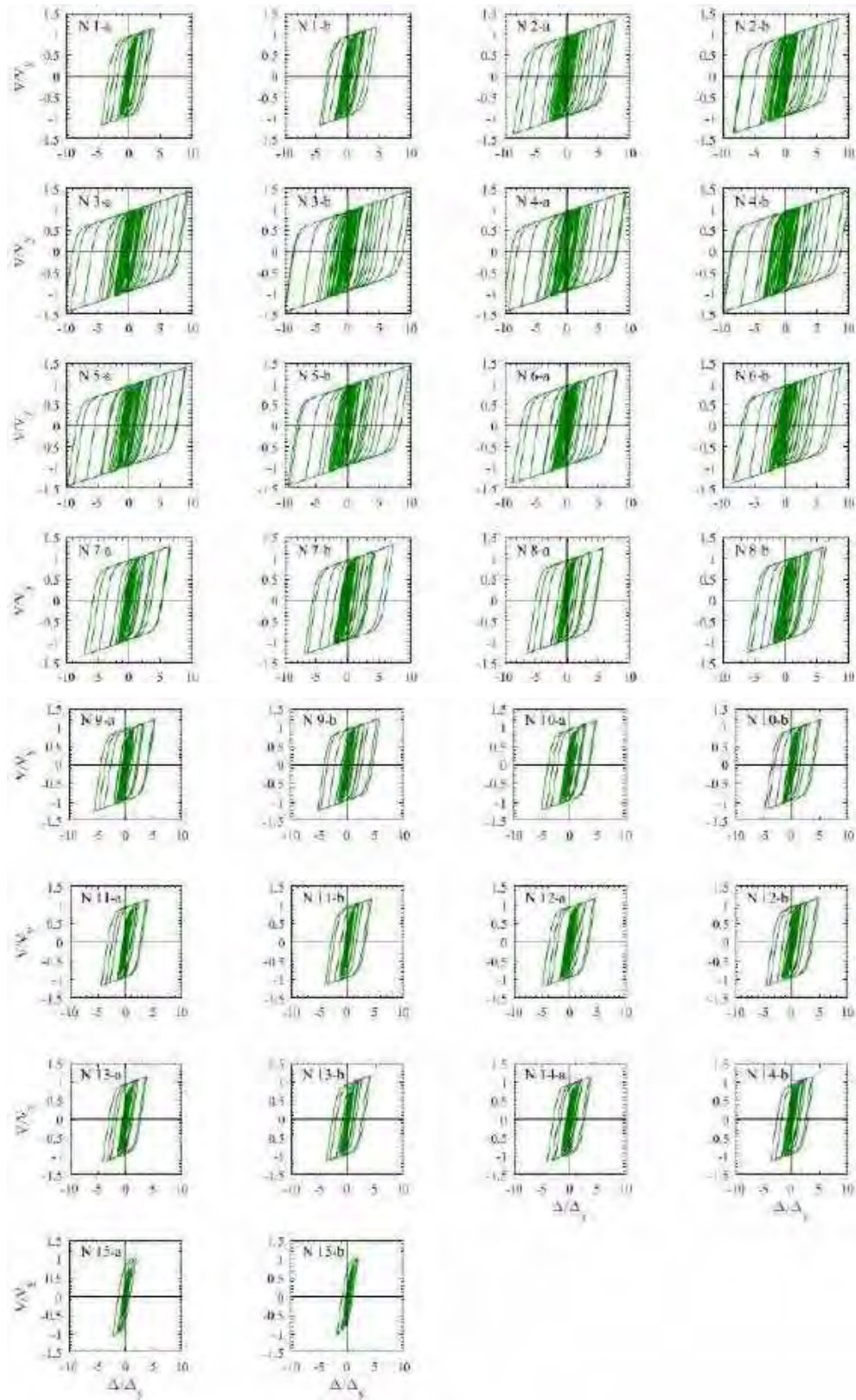
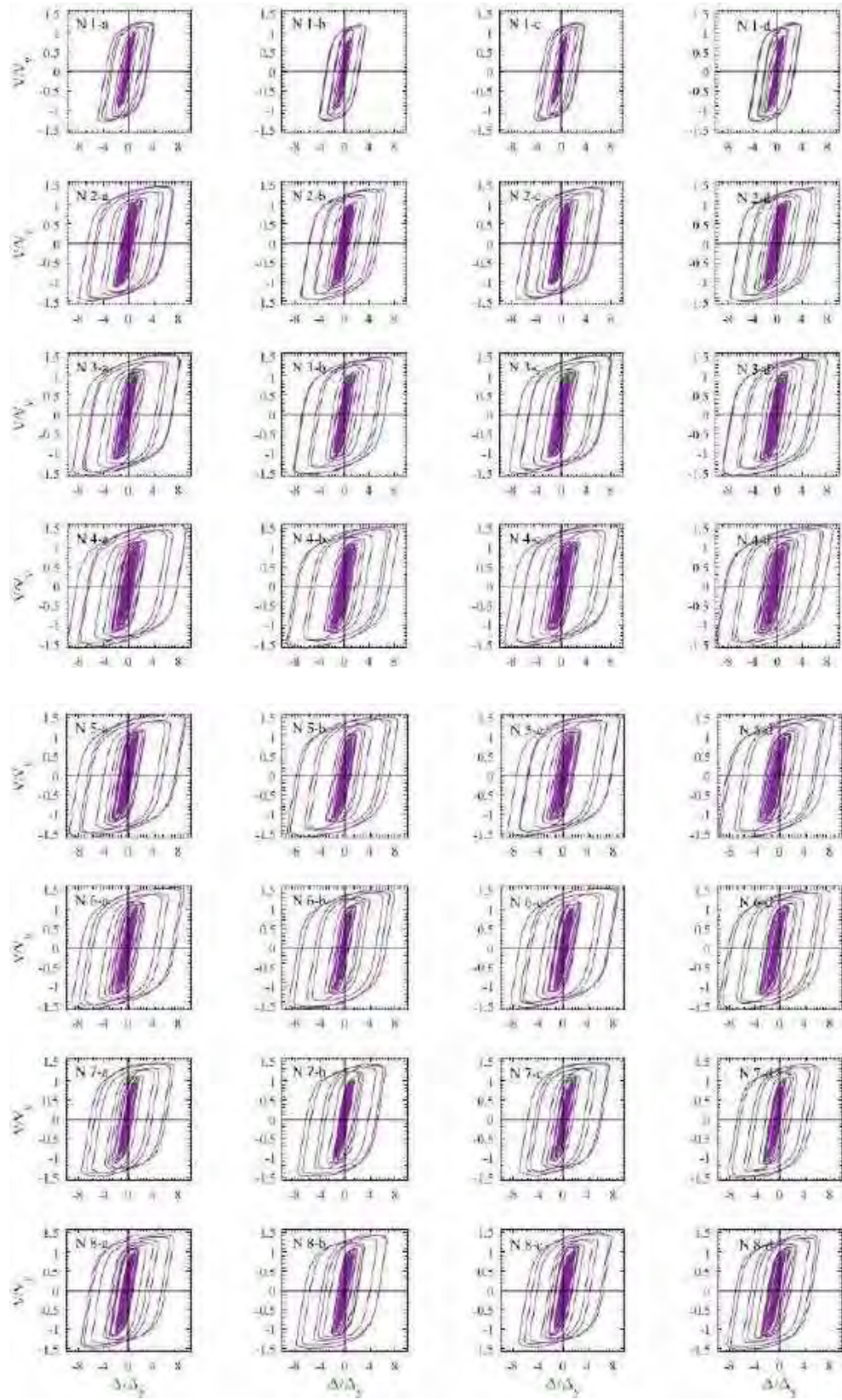


Figura 8.64. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, modelo de 15 entrepisos con base flexible, registros de aceleración MI15b



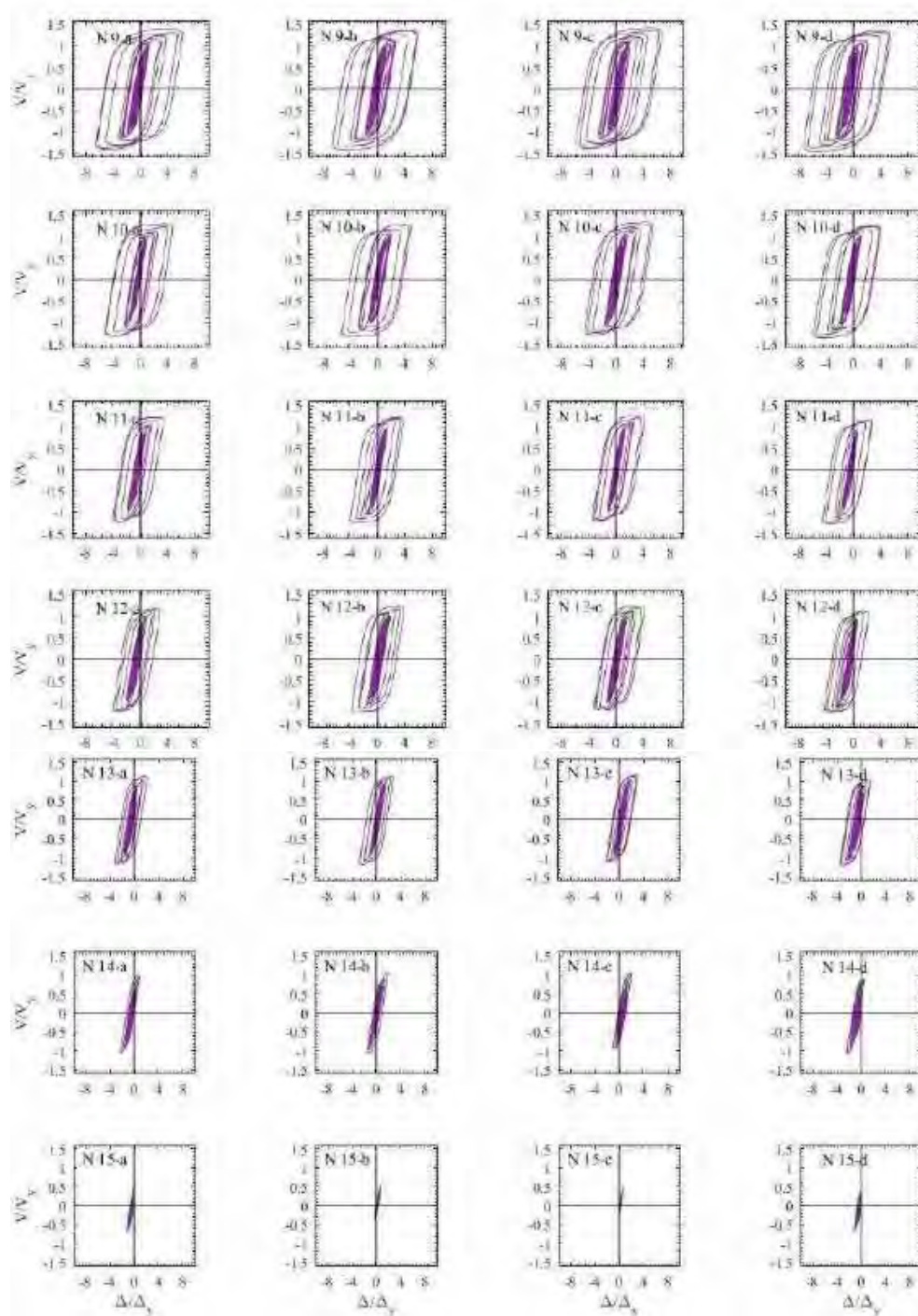
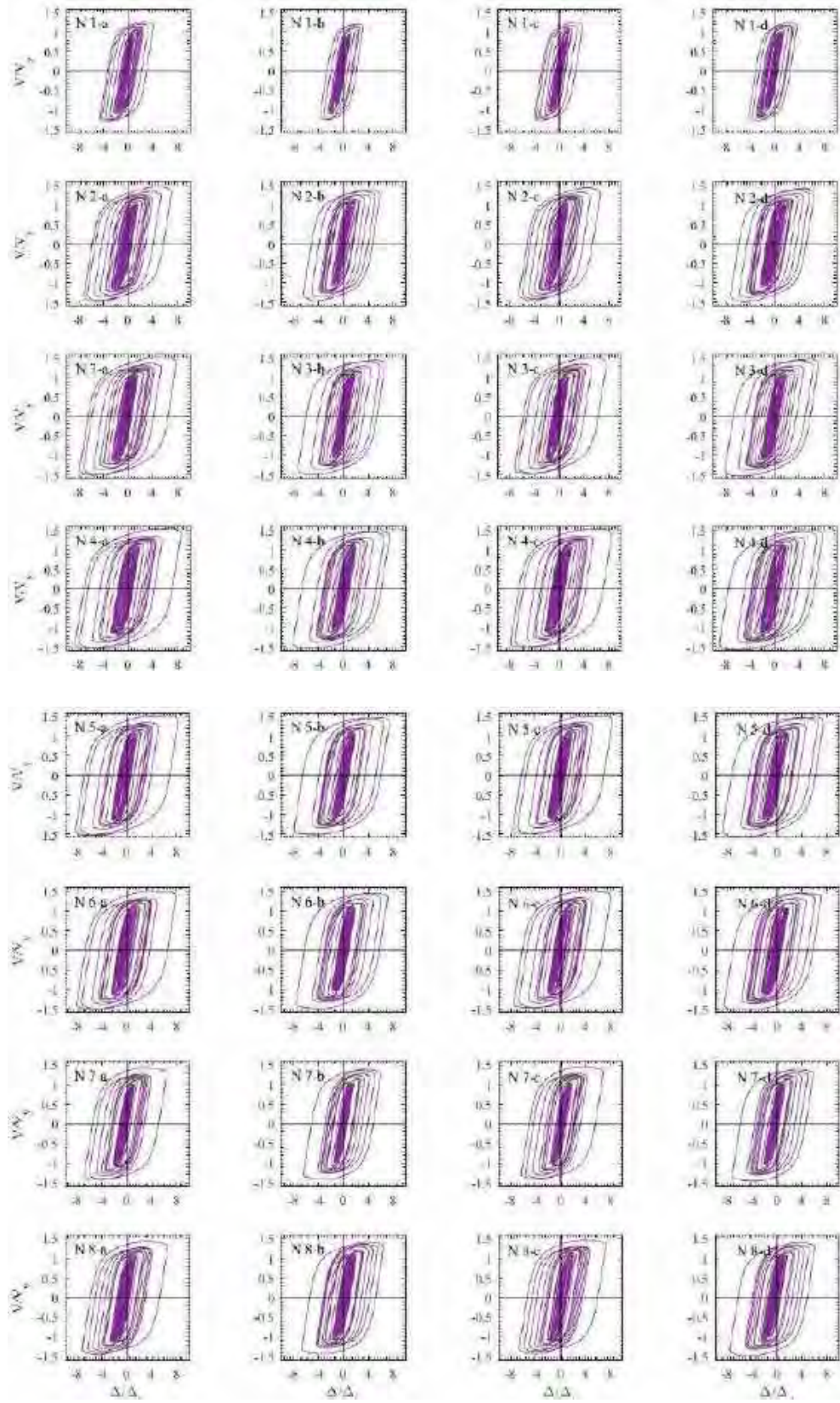


Figura 8.65. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, modelo de 15 entrepisos con base flexible, registros de aceleración M115a



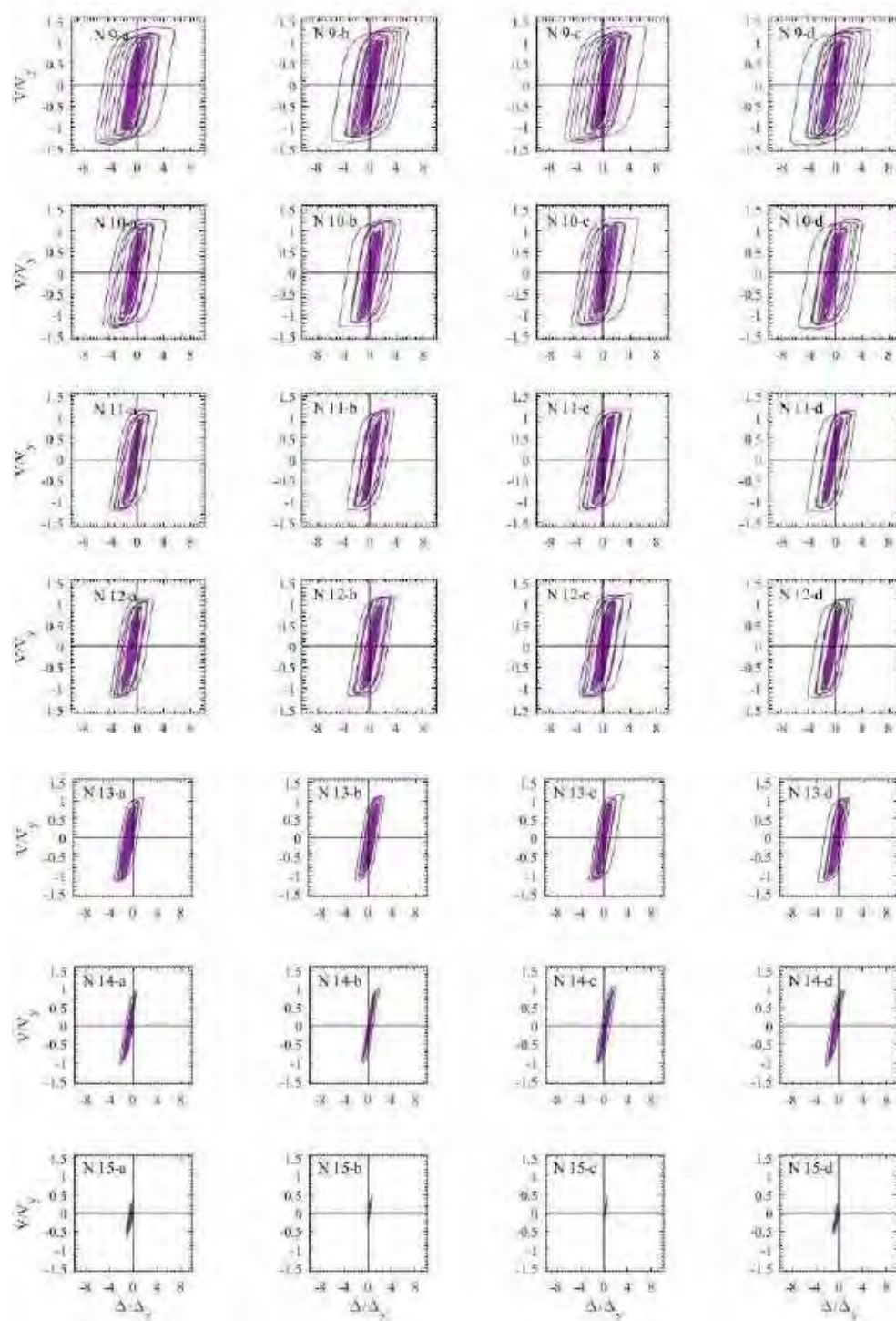
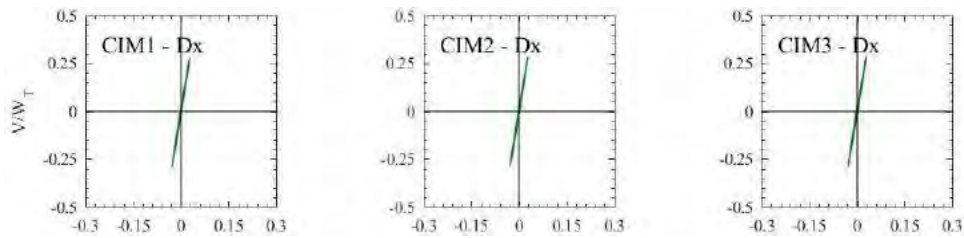
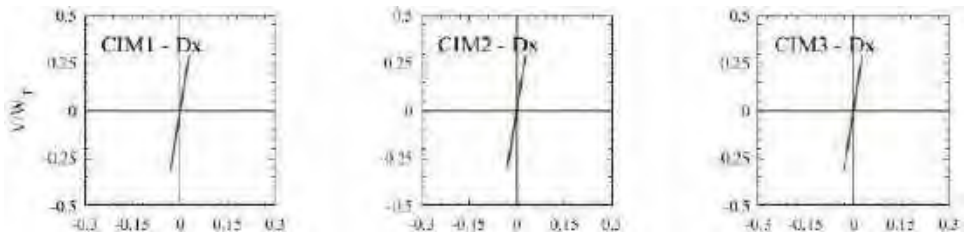


Figura 8.66. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, modelo de 15 entresijos con base flexible, registros de aceleración MI15b

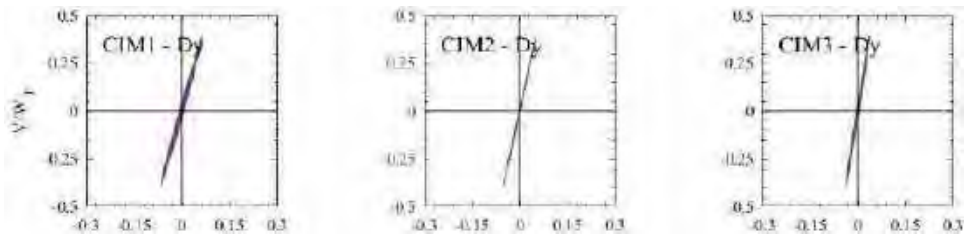
En las figuras 8.67 a 8.71 se presentan los ciclos histéricos por entrepiso que se desarrollan en la dirección x y y para el modelo de 15 entrepisos con base flexible. De manera general se observan que los ciclos histéricos en los entrepisos de los sótanos se comportan de manera elástica lineal para todos los casos y, por ende, el comportamiento global para la zona de cimentación será elástica también (figura 8.67). La respuesta con los dos casos de excitación para cada dirección de análisis en particular, presentan un comportamiento similar tanto en los valores de distorsión que se desarrollan, como en los valores del cortante de entrepiso normalizado con el peso total de la estructura. No obstante, es en la dirección y donde se obtienen los mayores valores de cortante de manera general (figura 8.70 y 8.71). Por ejemplo, en la dirección x , desde el primer entrepiso hasta al sexto, éstos desarrollan valores de $V/W_T \geq 0.25$ (figura 8.68 y 8.69); mientras que en la dirección ortogonal a ésta, desde el primer entrepiso hasta al octavo se desarrollan valores de $V/W_T \geq 0.30$ (figura 8.70 y 8.71).



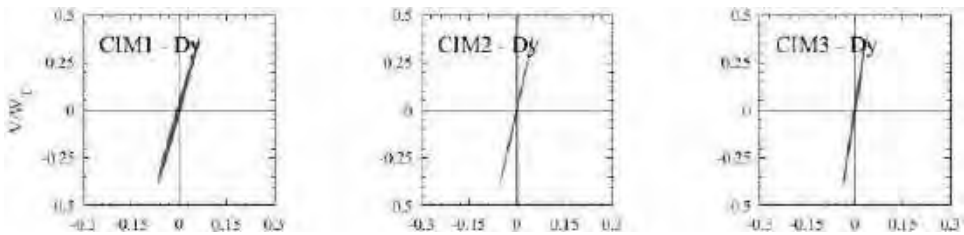
a) Dirección x , registro de aceleración MI15a



b) Dirección x , registro de aceleración MI15b



c) Dirección y , registro de aceleración MI15a



d) Dirección y , registro de aceleración MI15b

Figura 8.67. Ciclos de histéresis de los entrepisos de sótanos para el modelo de 15 niveles con base flexible

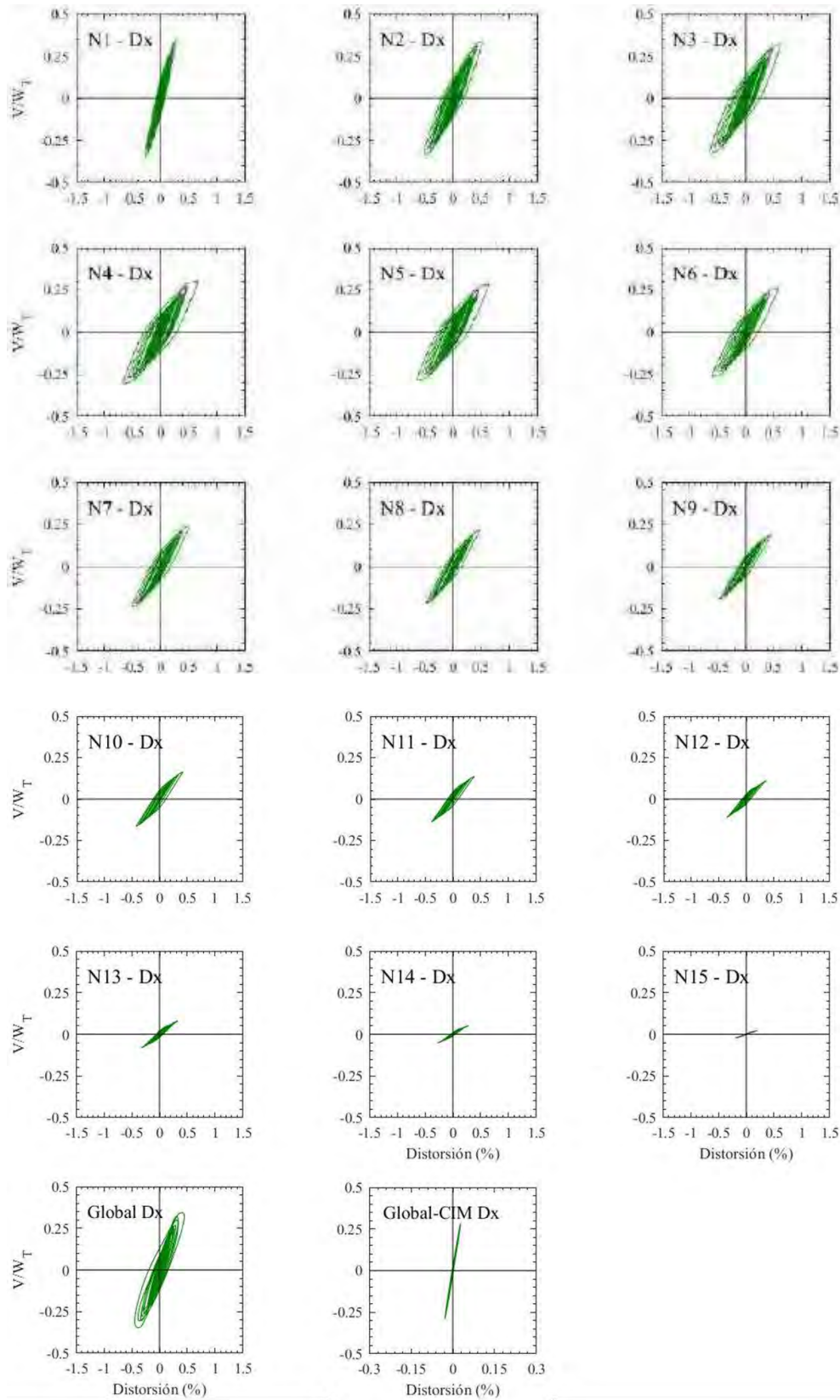


Figura 8.68. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, para el modelo de 15 niveles con base flexible, registros de aceleración MI15a

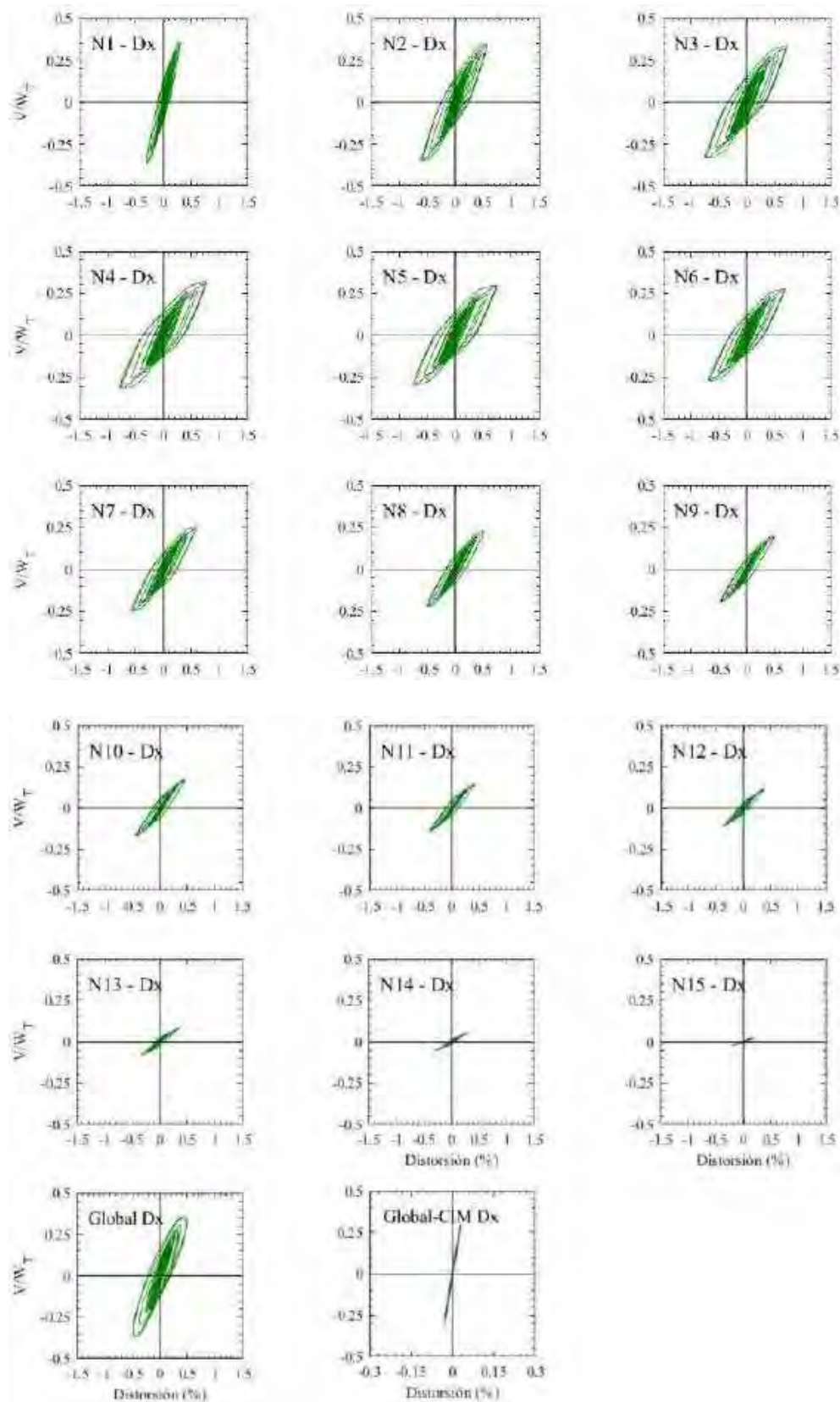


Figura 8.69. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección x , para el modelo de 15 niveles con base flexible, registros de aceleración MI15b

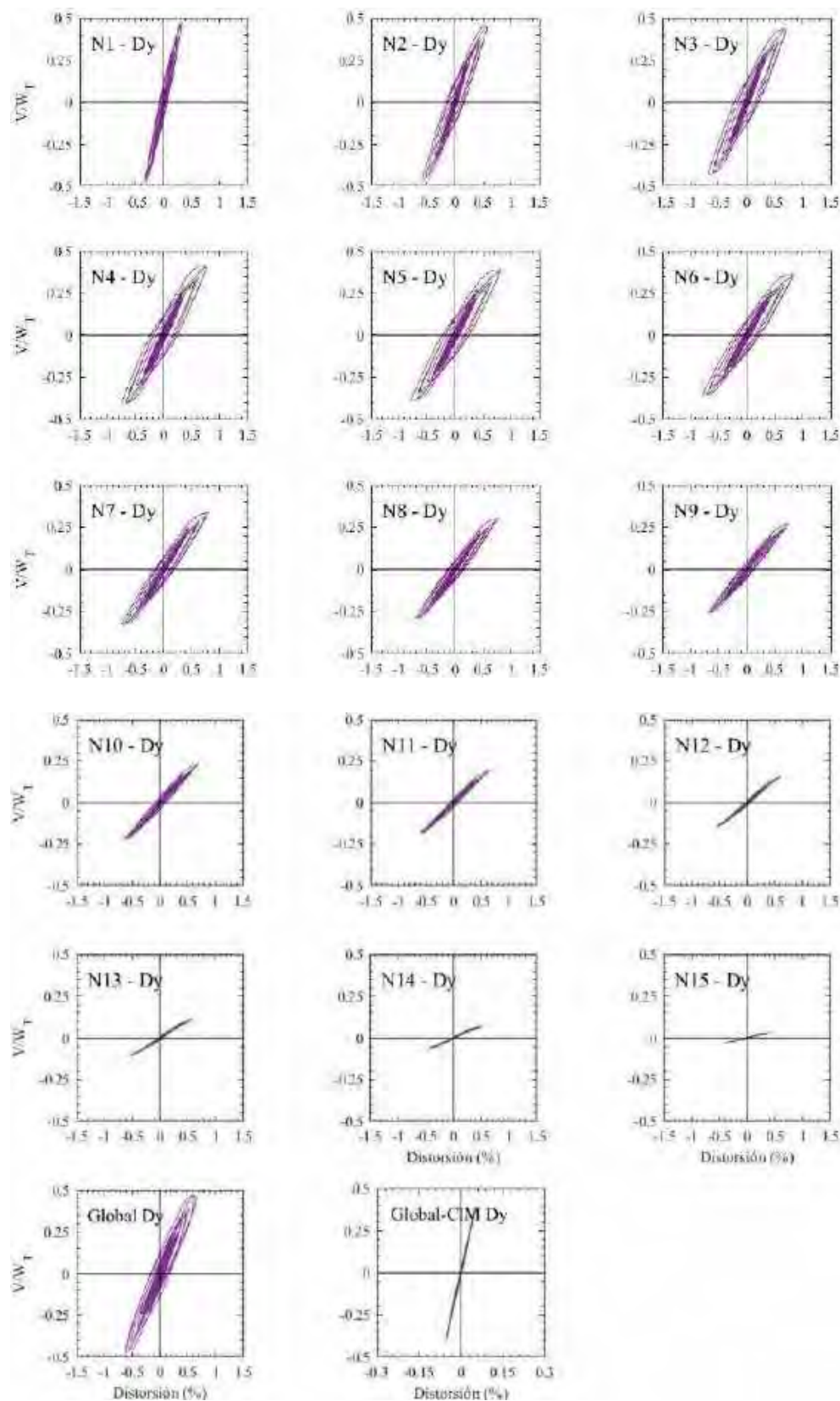


Figura 8.70. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, para el modelo de 15 niveles con base flexible, registros de aceleración MI15a

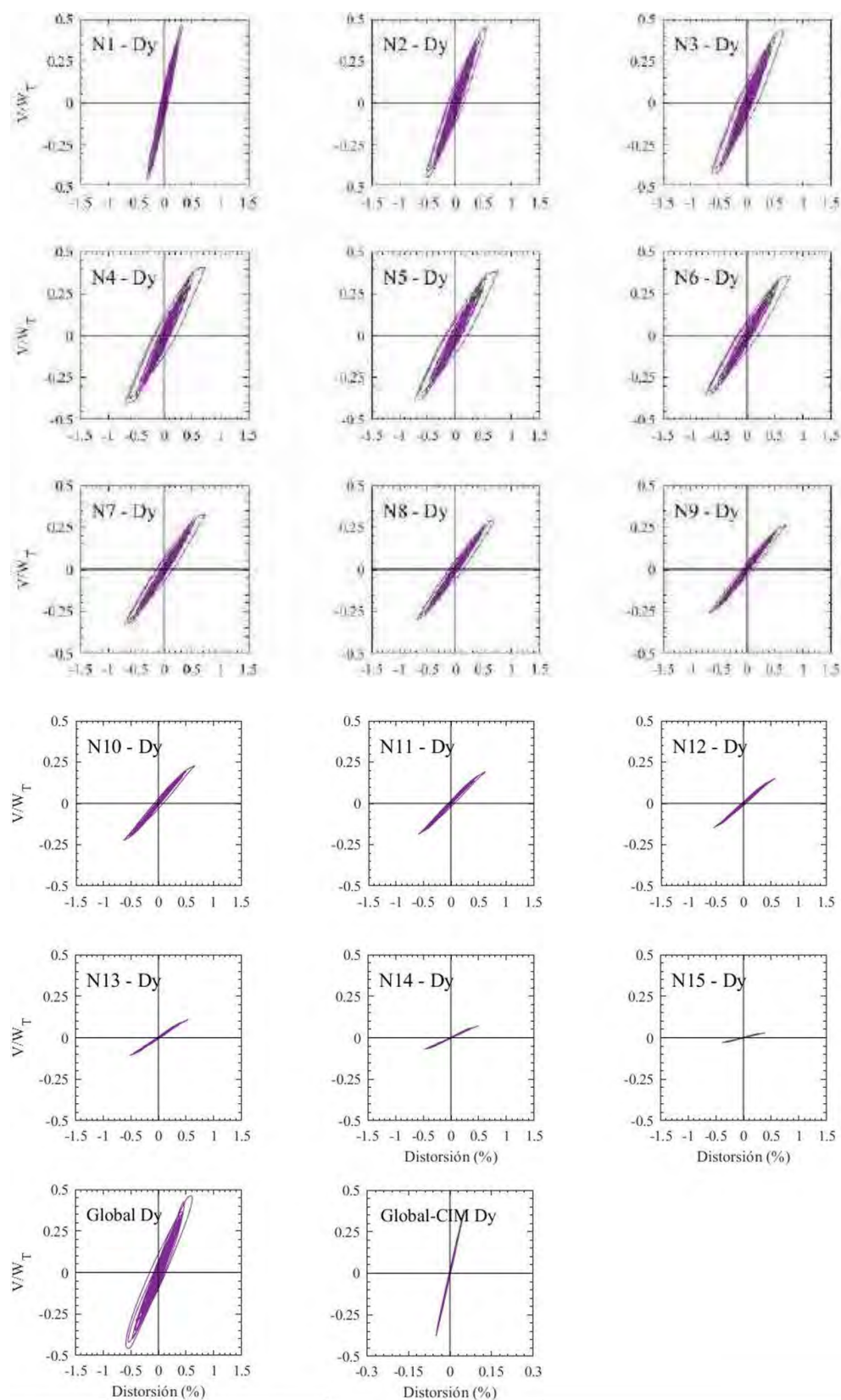


Figura 8.71. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, para el modelo de 15 niveles con base flexible, registros de aceleración MII5b

Con los mapeos de fluencias inelásticas de las figuras 8.72 a 8.75, se aprecia de manera general que el máximo comportamiento no lineal se concentra en los dispositivos de control de la respuesta sísmica y que algunas vigas presentan fluencias incipientes. Para la dirección x , se observa que los entresijos tres y cuatro son donde los disipadores desarrollan mayores magnitudes de ductilidad local para ambos casos de los registros de aceleración MI15 (figuras 8.72 y 8.73). Sin embargo, es en el caso B donde los elementos ADAS desarrollan las máximas ductilidades ($\mu_d \geq 10$), y esquemáticamente se aprecia de la figura 8.73 con un cambio en el código de colores utilizado para esos elementos. Asimismo, se observa que en esos entresijos las vigas desarrollan mayores niveles de rotación tanto para los marcos exteriores como para los interiores.

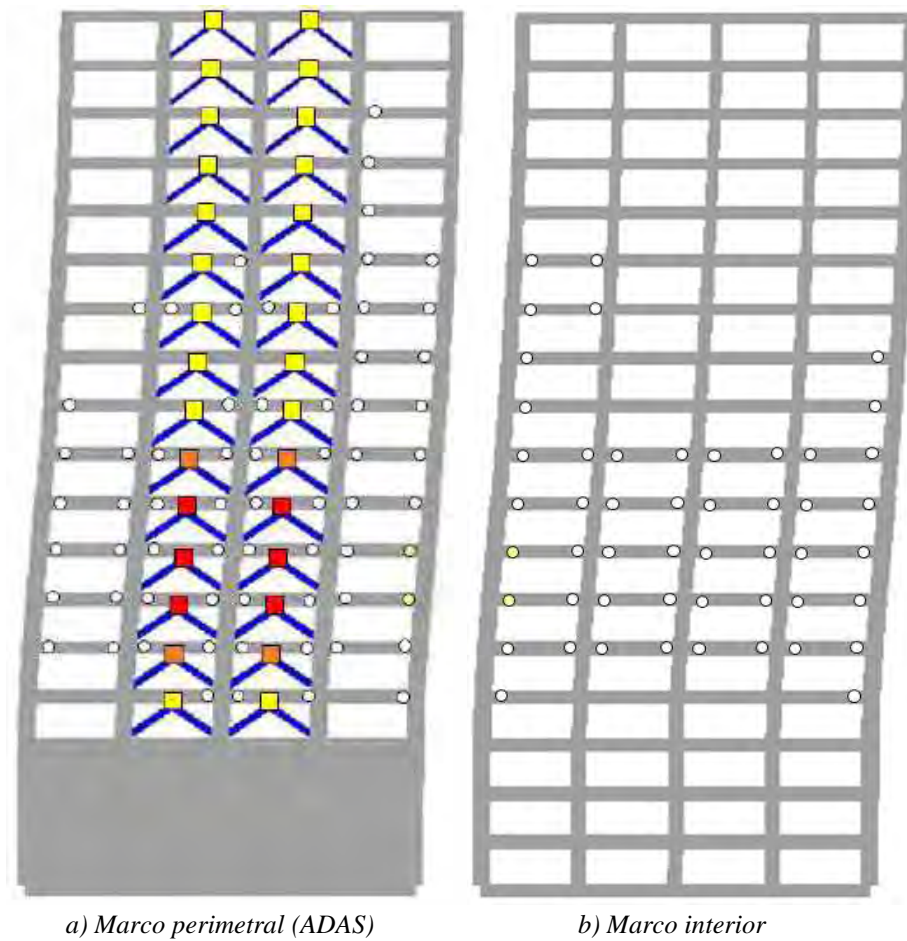


Figura 8.72. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección x , para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración MI15a

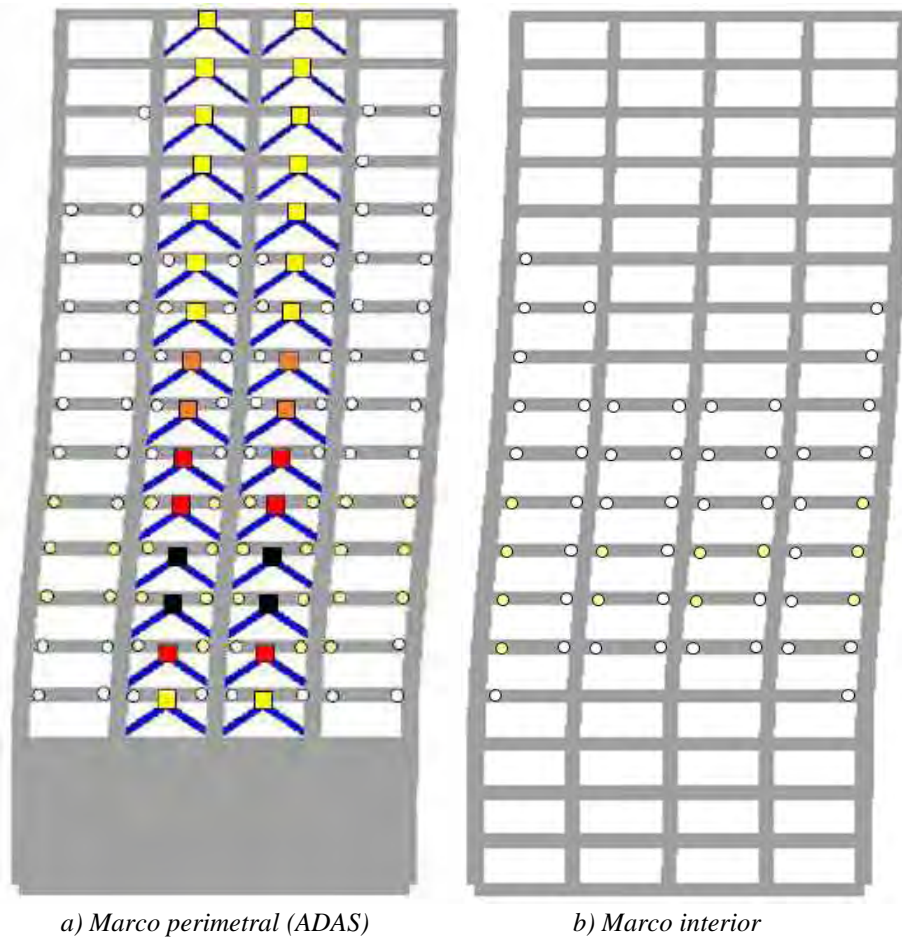
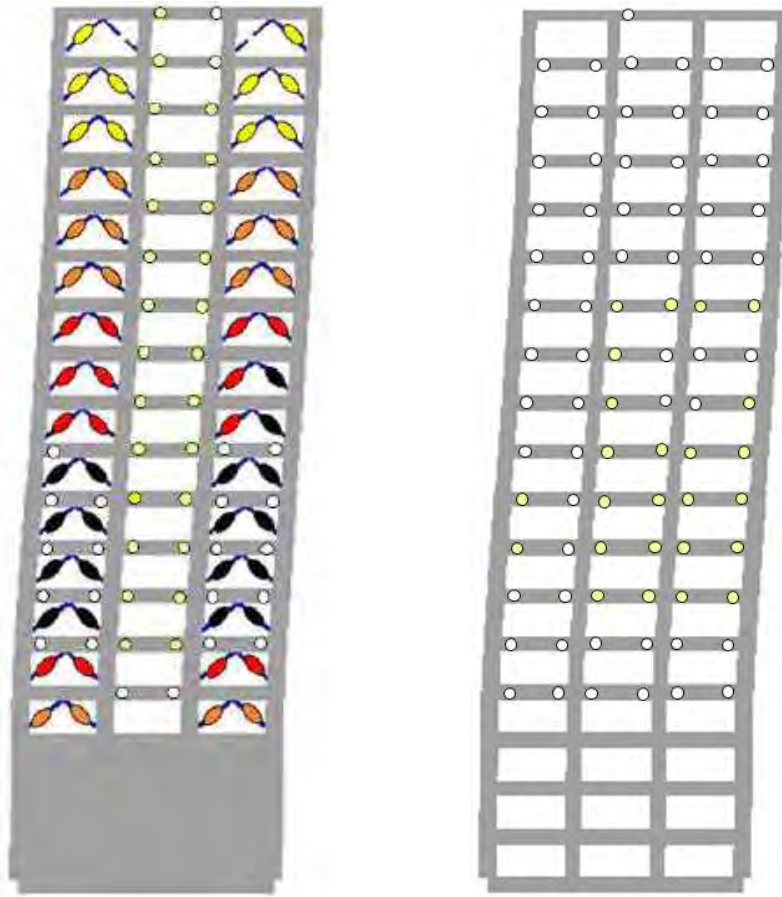


Figura 8.73. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección x, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración MI15b

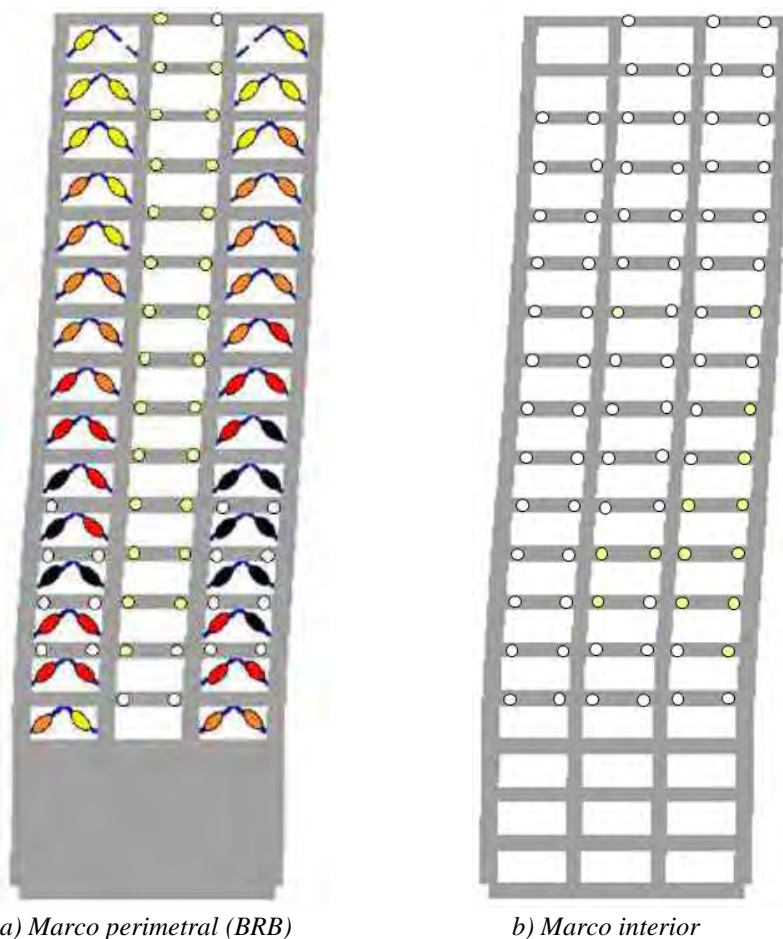
Por otra parte, en los mapeos de fluencias en la dirección y (figuras 8.74 y 8.75) se observa que la mayoría de los dispositivos BRBs participan de manera inelástica, con excepción de un par de dispositivos en el último entrepiso. Para ambos casos de excitación sísmica, se aprecia que varios BRBs llegarían a fallar y se encuentran ubicados de los entrepisos tres al seis, aunque con el caso A de los registros de aceleración MI15 se presentan mayor cantidad de BRBs con ductilidades locales de $\mu_d \geq 8$ (figura 8.75). Sin embargo, se presentan la misma tendencia que para la dirección x, donde las vigas desarrollan mayores niveles de rotación en los entrepisos, donde los disipadores desarrollan sus máximas ductilidades, e incluso para el caso A, un extremo de una de las vigas desarrolla fluencias del orden de menos del 15% de la rotación última de dicha sección (figura 8.75).



a) Marco perimetral (BRB)

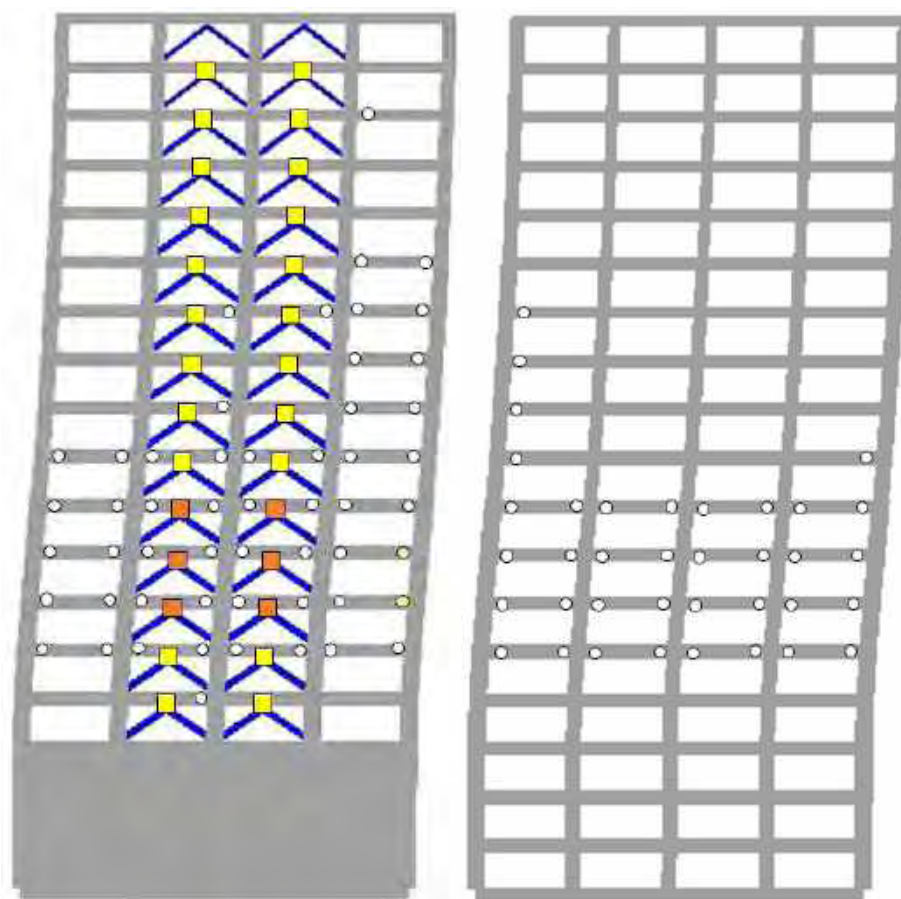
b) Marco interior

Figura 8.74. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración MI15a



a) Marco perimetral (BRB) b) Marco interior
 Figura 8.75. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección y , para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración MI15b

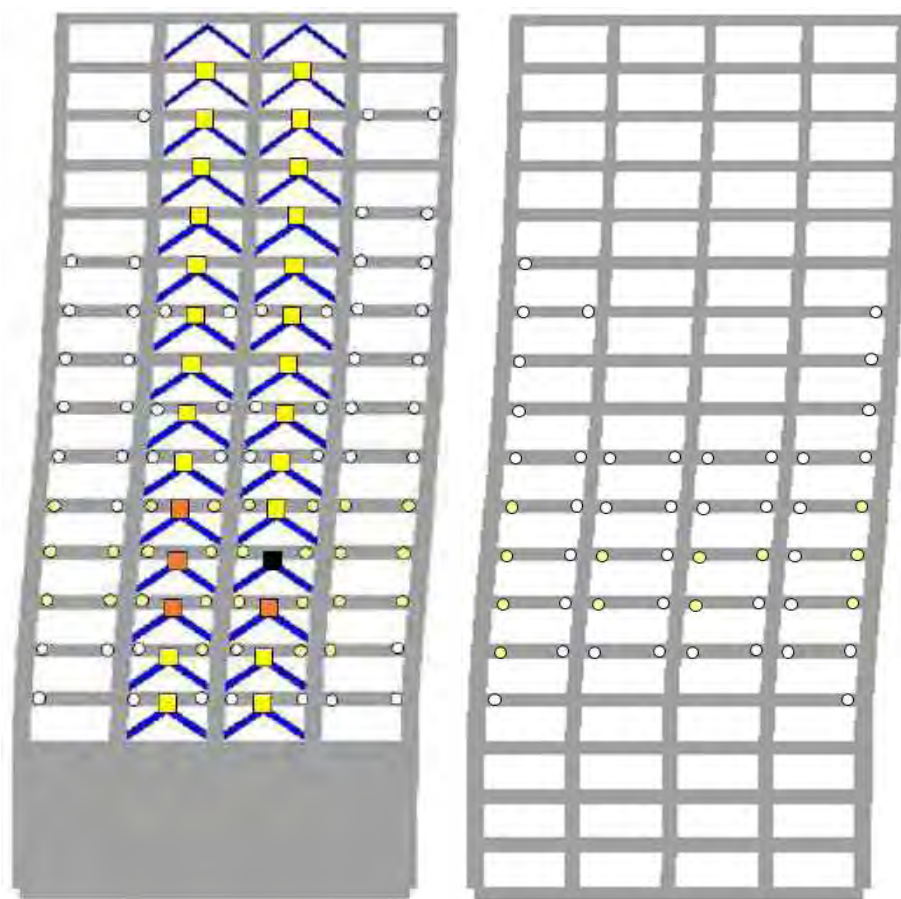
En las figuras 8.76 a 8.79 se presentan los mapeos de fluencias inelásticas residuales de los modelos de 15 entrepisos tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura. No se observa de éstas un cambio significativo entre las magnitudes de rotación máximas y las residuales para las vigas en la dirección x (figuras 8.76 y 8.77). No obstante, se aprecia que las vigas de los marcos interiores en la dirección y se reducen las magnitudes de rotación ante vibración libre, hasta ser menores del 5% de la rotación última del elemento. Sin embargo, para las vigas de los marcos exteriores en la misma dirección, continúan presentándose elementos con una rotación residual entre el 5% al 10% de la rotación última en los entrepisos, donde los disipadores desarrollaron su ductilidad máxima de diseño (figuras 8.78 y 8.79).



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

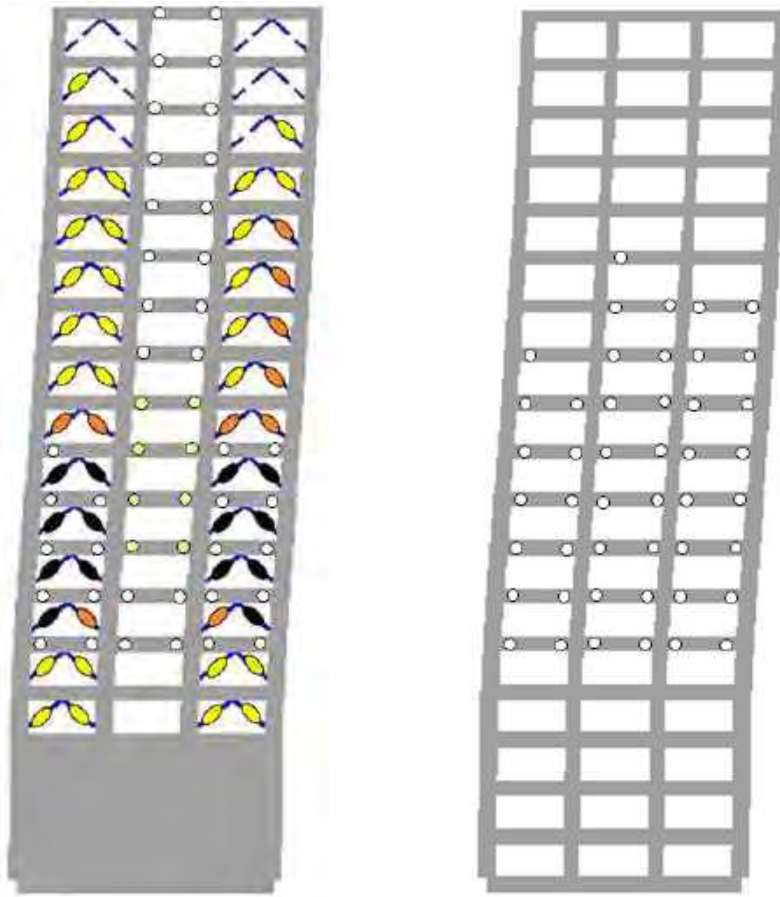
Figura 8.76. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección x , para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración MI15a



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

Figura 8.77. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección x , para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración MI15b



a) Marco perimetral (BRB)

b) Marco interior

Figura 8.78. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración MI15a

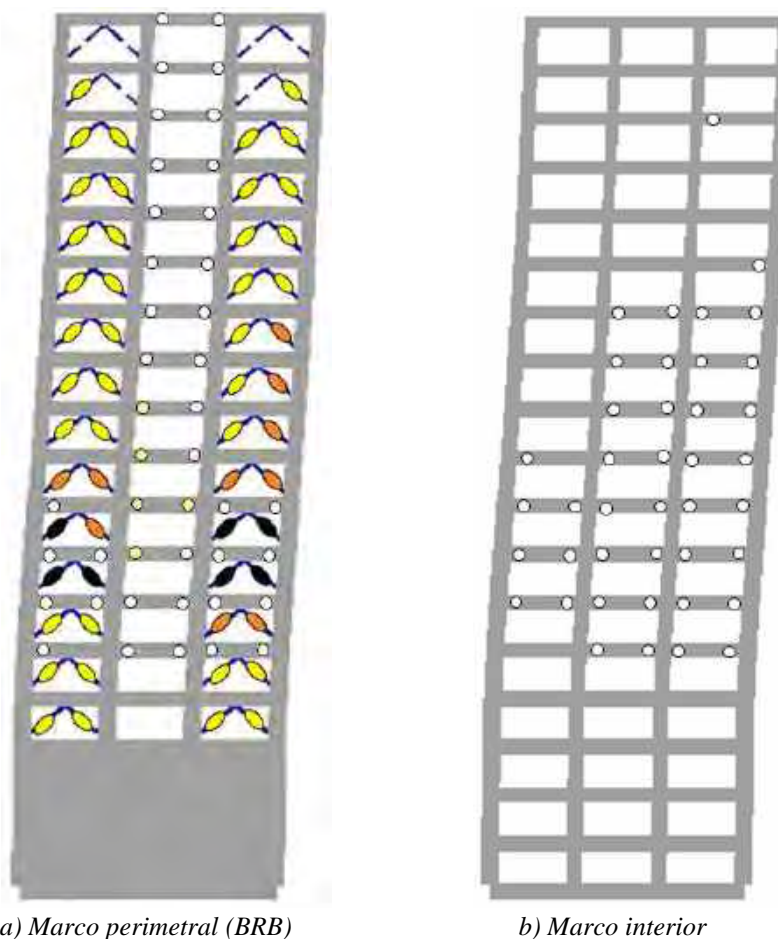


Figura 8.79. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base flexible, registros de aceleración MI15b

De manera similar que para los otros modelos evaluados, en la figura 8.80 se presentan los ciclos histeréticos que desarrollan las vigas con los mayores valores de rotación durante la excitación sísmica. Se grafican también la idealización bilineal del elemento de concreto en cuestión, para comparar los niveles de rotación que se generan con el análisis dinámico no lineal paso a paso. Se aprecia de éstas que el mayor valor de rotación para las vigas se presenta en la dirección y con el caso A de los registros de aceleración MI15 (figura 8.80b). Si se comparan las rotaciones obtenidas para el modelo con base rígida y base flexible, en este último se amplifican en un 30% aproximadamente las demandas máximas de rotación que se presentan en las vigas V1x para la respuesta máxima (figura 8.80a). Además, con el cambio de la respuesta dinámica por efectos de la interacción suelo-estructura, la viga con mayor valor de rotación cambia de la sección V3y (figura 8.61b) a la sección V2y y gráficamente se aprecia la diferencia con el cambio en el código de color para la representación de su fluencia inelástica (figura 8.74a).

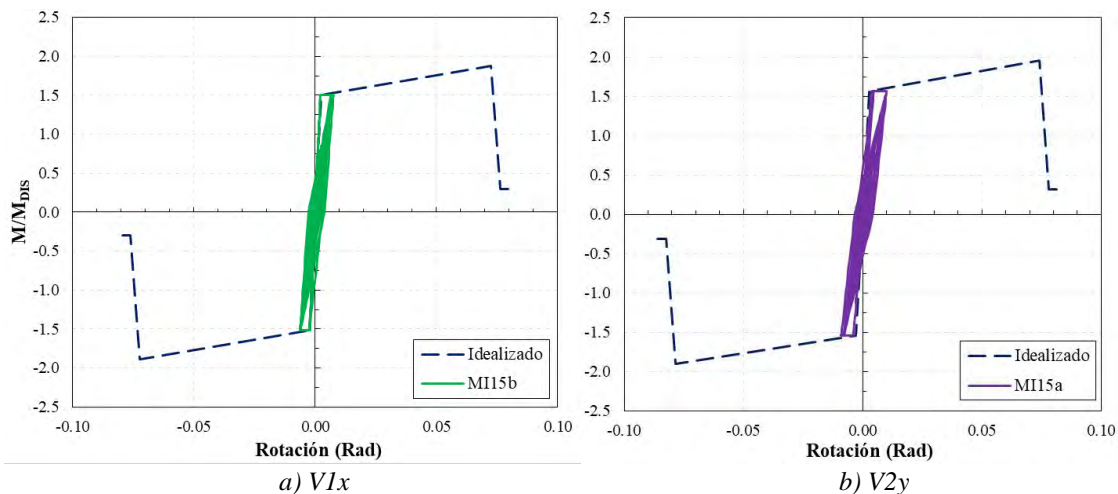


Figura 8.80. Máximas rotaciones en vigas para el edificio de 15 entrepisos con base flexible

8.5.3 Respuestas globales

En las gráficas que se presentan a continuación, se muestran y comparan los resultados representativos de la respuesta global de los edificios de 15 entrepisos con base rígida y base flexible. Para cada figura en particular, se grafica la respuesta promedio generado por todos los registros de aceleración representativos de la zona IIIa (tabla 8.2), y la respuesta máxima que se presenta por efecto de los registros de aceleración MI15, los cuales provocaron las ductilidades máximas a los dispositivos ADAS y BRBs. Por ejemplo, en las figuras 8.67 y 8.68 se reportan las distorsiones de fluencia (Δ_y) y máxima (Δ_{max}), asociadas a condiciones de servicio y al control de daño a los elementos de concreto reforzado del marco, tanto para base rígida como para base flexible. Con círculos verdes se representa la distorsión promedio desarrollada para la dirección x , y con rombos morados la distorsión promedio para la dirección y . Además, se coloca en cada una de ellas las distorsiones obtenidas del proceso de diseño (capítulo seis) para cada dirección de análisis.

Se observa de las gráficas de la figura 8.67 que las distorsiones generadas por los registros de aceleración MI15, así como con la respuesta promedio, no sobrepasan las distorsiones permisibles propuestas en la etapa de diseño, tanto para la consideración Δ_y como para la de Δ_{max} . Se observa que los valores promedio para la distorsión Δ_y en la dirección x , son muy similares a los valores obtenidos con ambos casos para los registros de aceleración MI15. También, se aprecia que a partir del décimo entrepiso los valores promedios de Δ_y en la dirección y sobrepasan los obtenidos en la etapa de diseño (figura 8.81). Evaluando las distorsiones Δ_{max} , se observa que la respuesta promedio es mayor en la dirección x hasta el quinto entrepiso y después de éste, los valores son mayores para la dirección y . Además, dichos valores no son mayores a 0.6%, aunque se incrementan hasta 0.9% con la respuesta máxima en la dirección x (figura 8.82). Asimismo, se observa que los valores de Δ_{max} son menores hasta en un 60% con respecto a las obtenidas con la respuesta promedio (figura 8.82).

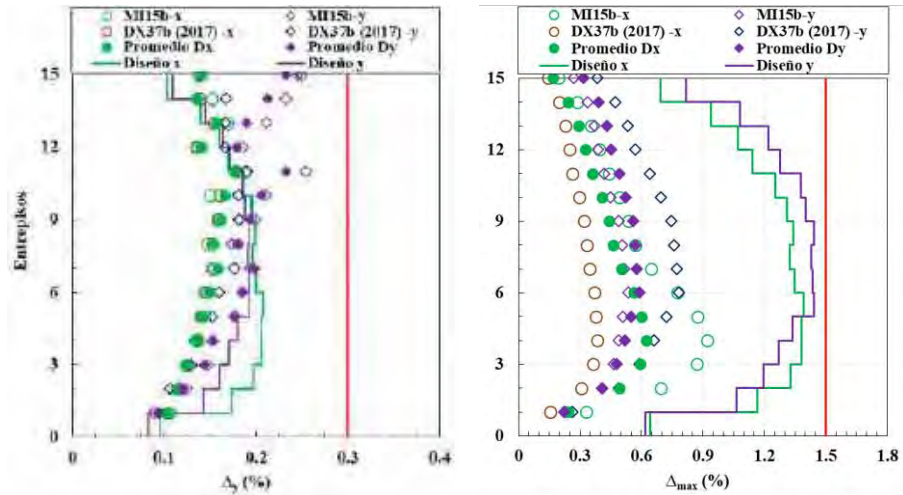


Figura 8.81. Distorsiones de fluencia y máximas, modelo de 15 niveles con base rígida

Si se comparan los resultados de distorsiones obtenidas con el modelo con base rígida contra aquéllos generados con base flexible (figura 8.82), se observa de manera general que se amplifican los valores promedios, sobre todo para la dirección y en la condición de servicio (Δ_y), donde se aprecia que desde el quinto entrepiso rebasan los valores con respecto a los derivados del análisis modal espectral en la etapa de diseño. A pesar que los valores obtenidos en el último entrepiso en la dirección y con los registros de aceleración MI15, sobrepasan el límite propuesto, el valor promedio sigue estando por debajo del valor permisible. Por otra parte, se observa que tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura, los valores para Δ_{max} se amplifican hasta un 28%, comparando directamente los valores del entrepiso seis con base flexible. Igualmente, se aprecia que los valores promedios obtenidos con el modelo de base flexible son, en ambos casos, menores que los obtenidos con los registros de aceleración MI15 (figura 8.82).

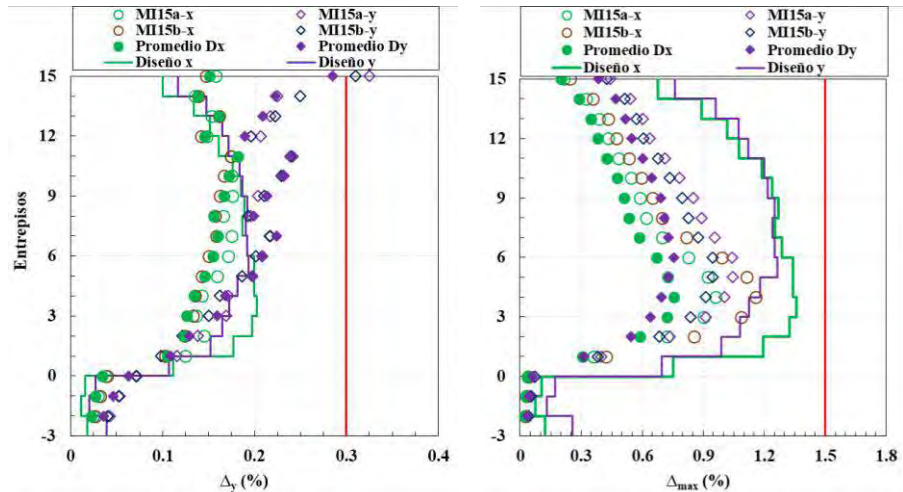


Figura 8.82. Distorsiones de fluencia y máximas, modelo de 15 niveles con base flexible

En la figura 8.83 se resume la respuesta global que desarrolla la estructura de 15 entrepisos con base rígida con los registros de aceleración MI15. Se aprecia de éstas que en la dirección y se genera hasta un 29% más cortante que en la dirección x , evaluando los valores promedios obtenidos. Sin embargo, las demandas de ductilidad promedio que se desarrollan son mayores para la dirección x hasta en un 42%. Igualmente, los valores promedio de las sobrerresistencias son muy similares entre sí para los entrepisos dos a cinco, aunque estos valores se encuentran entre $1.5 < V_y/V_{max} < 2.5$. Se aprecia también, que los mayores valores de ductilidad por entrepiso (μ_{max}) se generan en la dirección x para el caso B de los registros de aceleración MI15, mientras que los máximos valores de sobrerresistencias se obtuvieron con el caso B de los registros de aceleración DX37, siendo éstos de $V_y/V_{max} > 2.5$ para la mayoría de los entrepisos (figura 8.83).

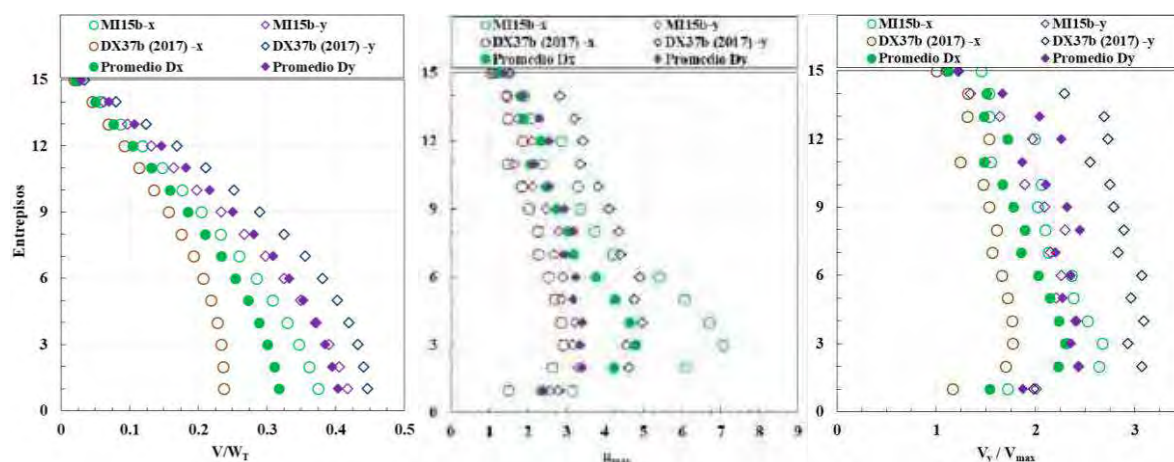


Figura 8.83. Resumen de la respuesta global, modelo de 15 niveles con base rígida

En la figura 8.84 se presenta gráficamente la respuesta global que desarrolla el modelo de 15 entrepisos con base flexible. Los cortantes promedios que desarrollan cada entrepiso son muy similares, comparándolos con los obtenidos modelando su base como rígida. Sin embargo, se aprecia que los resultados máximos obtenidos en la dirección x ahora pertenecen a los generados con los registros de aceleración MI15 para el caso B, y dichos cortantes se amplifican de manera considerable hasta un 54% en el primer entrepiso. El mismo caso sucede con los valores obtenidos para las sobrerresistencias promedio por entrepiso, aunque estos valores tienen menor dispersión con respecto a los máximos generados con los registros MI15 para cada dirección evaluada. Si bien, los valores de μ_{max} siguen siendo mayores para la dirección x , las ductilidades máximas y las promedios sufren una amplificación del 20% aproximadamente con respecto a los obtenidos con base rígida. Finalmente, se observa que los entrepisos de los sótanos se obtienen valores de 1.0 para las ductilidades máximas (μ_{max}) y de sobrerresistencia debido a que éstos se comportan de manera elástica (figura 8.84).

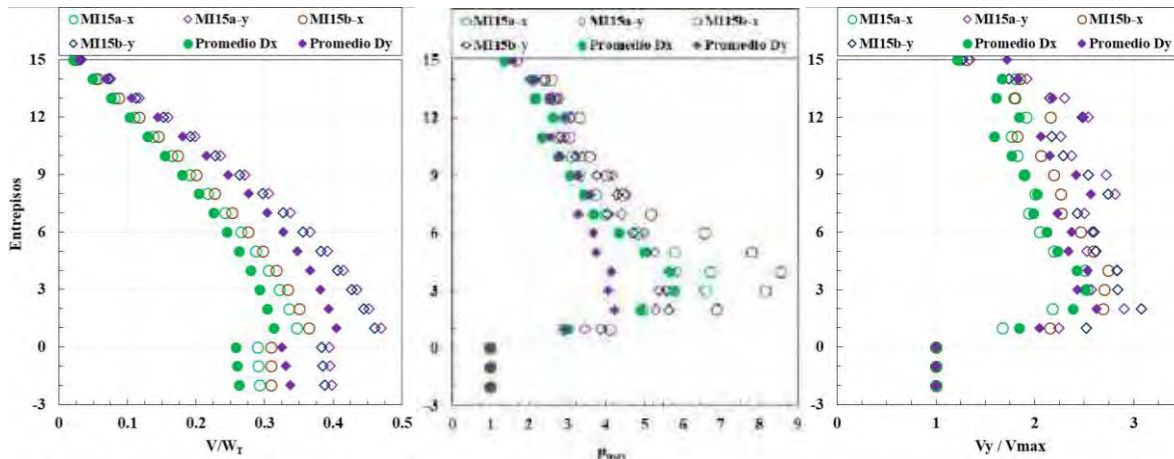


Figura 8.84. Resumen de la respuesta global, modelo de 15 niveles con base flexible

En la figura 8.85 se resume la respuesta asociada a los ciclos inelásticos que el edificio de 15 entrespisos con base rígida genera. De manera general, se observa que del total de ciclos histeréticos que se producen por la respuesta promedio de todos los registros de aceleración, entre el 20% al 40% son del tipo inelástico para la dirección x y y . Por otra parte, se observa que los registros de aceleración MI15 desarrollan más ciclos histeréticos inelásticos en dos terceras partes de los entrespisos evaluados, para ambas direcciones de análisis (figura 8.85). Analizando las relaciones $K_{min}/K_{elástica}$ y $K_{prom}/K_{elástica}$, se observa que tanto para la respuesta promedio como para la máxima registrada, los valores en la dirección x son menores que los que se desarrollan en su dirección ortogonal. Para cada una de éstas, se observa que los valores mínimos se desarrollan en los entrespisos tres y cuatro, que son donde se desarrollan las mayores ductilidades locales de los disipadores de energía (ADAS y BRBs). Caso contrario sucede con los últimos cuatro entrespisos de la dirección y , donde los valores promedios evaluados son más cercanos a uno ($K_{min}/K_{elástica} \geq 0.9$); es decir, a pesar que se presentan un alto número de ciclos inelásticos (entrespiso 13), no se presenta una gran pérdida de rigidez en el entrespiso.

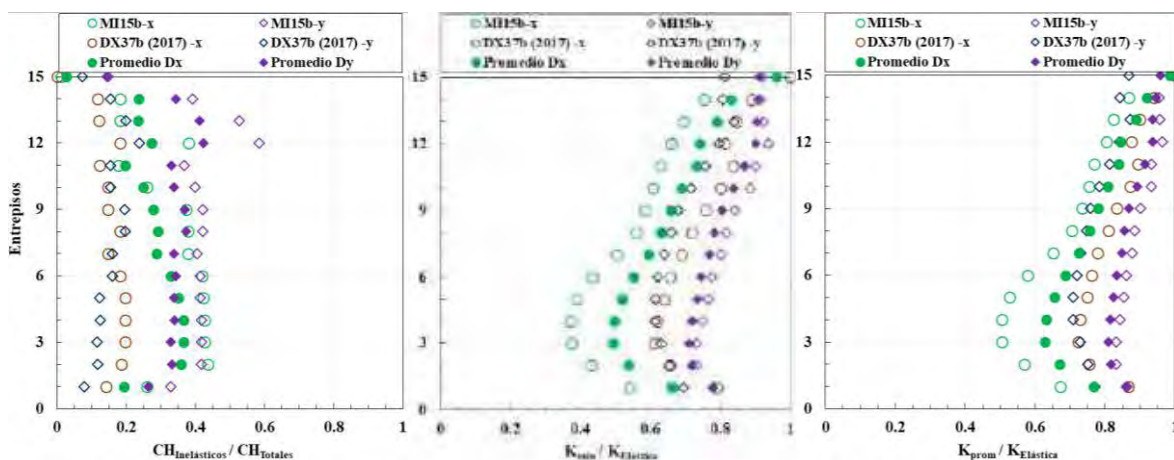


Figura 8.85. Resumen de los ciclos inelásticos para el modelo de 15 niveles con base rígida

Los resultados promedios relacionados a los ciclos histeréticos del modelo con base flexible (figura 8.86) son muy similares a los obtenidos modelando la base del mismo edificio como rígida (figura 8.85). Sin embargo, si se evalúa la respuesta máxima que se obtiene para la dirección x , se observa que se presentan más ciclos histeréticos del tipo inelástico en los entresijos dos al seis. Para los registros de aceleración MI15 en su caso B, se siguen generando las mayores pérdidas de rigidez por entrepiso en la dirección x (figura 8.86), pero éstas disminuyen hasta en un 15% con respecto a las de base rígida (figura 8.85).

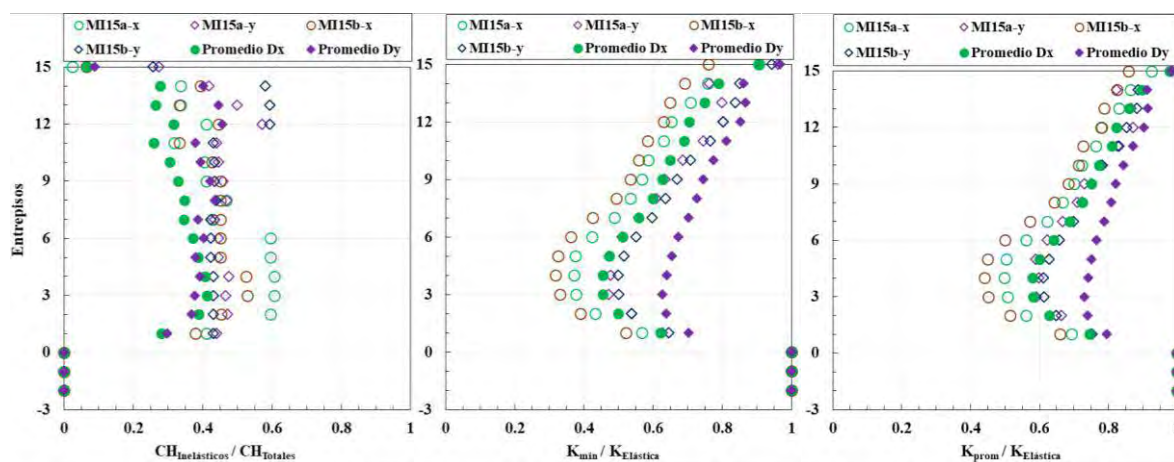


Figura 8.86. Resumen de los ciclos inelásticos para el modelo de 15 niveles con base flexible

En la figura 8.87 se presentan las relaciones de distorsiones residuales para la respuesta máxima y la respuesta promedio del edificio de 15 entresijos con base rígida. De manera general, se aprecia que la respuesta promedio en ambas direcciones, es mayor que las respuestas máximas obtenidas con los registros de aceleración que desarrollaron las ductilidades máximas locales en los disipadores (MI15 y DX37). Además, se aprecia que las distorsiones residuales son mayores para la dirección x en los primeros seis entresijos del edificio, con un valor máximo de 0.0051% (d_r). Esto quiere decir que después del evento sísmico la estructura exhibe una deformación lateral permanente casi nula, a pesar que algunas vigas desarrollan fluencias incipientes menores al 10% de su rotación última. Dichas distorsiones residuales representan menos del 5% de la distorsión máxima de descarga justo cuando sucede la distorsión máxima absoluta, aunque los valores máximos corresponden para el último tercio de los entresijos en dirección y (figura 8.87). Finalmente, la relación entre la distorsión residual y la distorsión máxima son menores del 0.01% en la respuesta promedio de la estructura para la dirección x , e incluso este valor se reduce hasta el 0.038% para el valor máximo de la respuesta promedio en la dirección y (figura 8.87).

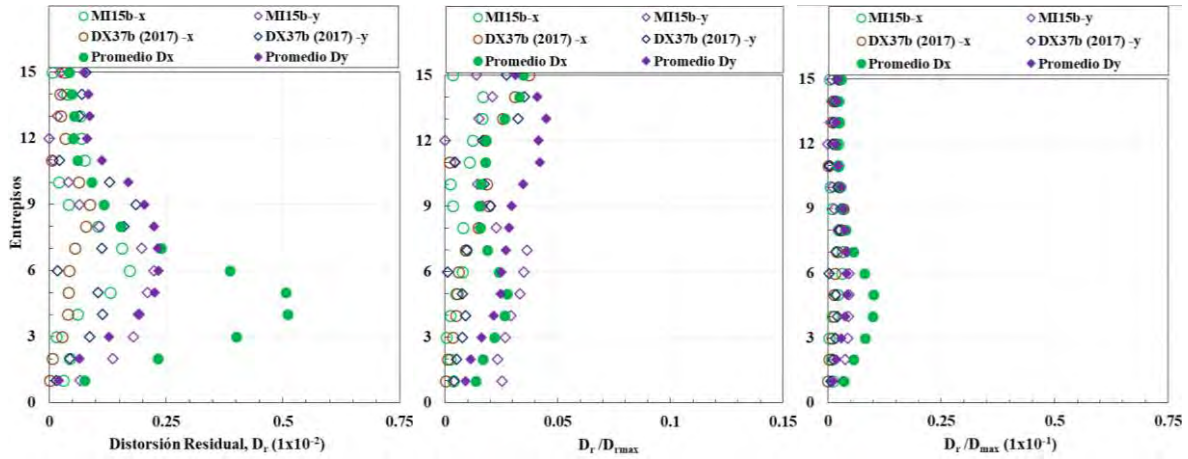


Figura 8.87. Distorsiones residuales absolutas y normalizadas máximas, modelo de 15 niveles con base rígida

En la figura 8.88 se presentan las relaciones de distorsiones residuales para el edificio de 15 niveles considerando tres niveles de sótano y los efectos de la interacción suelo-estructura. Aunque la respuesta promedio sigue siendo mayor que la respuesta máxima con los registros de aceleración MI15 en la dirección x ; por el contrario, la respuesta promedio en la dirección y ahora es mayor que para la dirección x con un valor máximo de 0.0063%. Además, se aprecia que las relaciones $d_r / d_{r,max}$ se amplifican para los valores promedios en un 55% para el primer tercio de la altura total. No obstante, esta relación sigue siendo menor al 5% de la distorsión máxima de descarga, y para el caso más desfavorable, este parámetro alcanza valores del 10% para el último entrepiso en la dirección y . Nuevamente, es importante mencionar que a pesar que existen amplificaciones tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura en los modelos, estos valores siguen sin representar un problema para el funcionamiento del inmueble después de un evento sísmico importante, aun cuando los disipadores de energía desarrollan sus ductilidades máximas para las que fueron diseñadas.

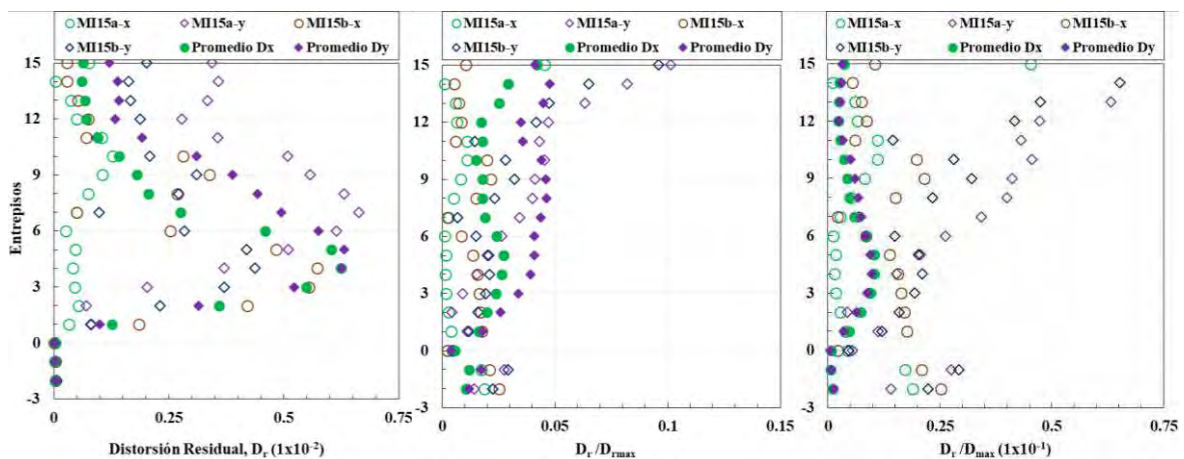


Figura 8.88. Distorsiones residuales absolutas y normalizadas máximas, modelo de 15 niveles con base flexible

8.6 Modelos de 24 entresijos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los análisis dinámicos paso a paso no lineales del modelo más esbelto diseñado (figuras 8.89 a 8.134). Los registros de aceleración que se indujeron al edificio, son representativos de la zona IIIb de la Ciudad de México, cuyas características principales se resumen en la tabla 8.3. A continuación, se muestran los resultados máximos que desarrolla la estructura, para cada dirección de análisis, en función de las ductilidades máximas que desarrollan los disipadores de energía, así como de sus respectivos mapeos de fluencias inelásticas. Los resultados obtenidos por los otros pares de registros de aceleración se presentan en el apéndice H.

8.6.1 Base rígida

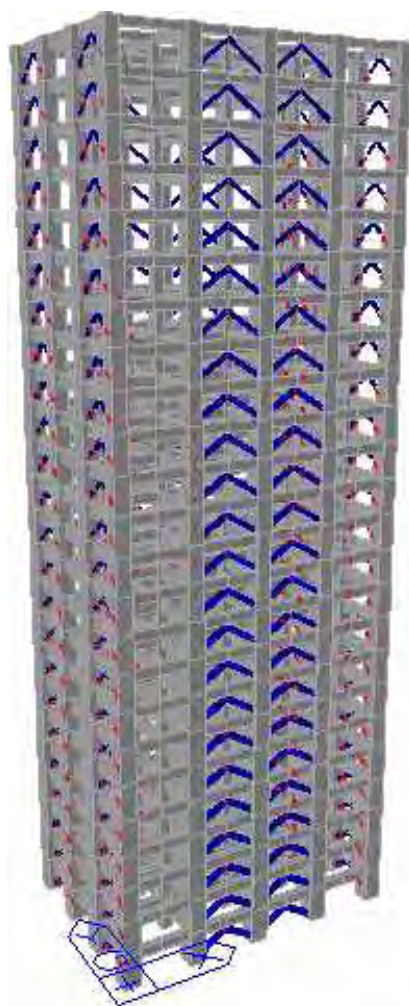
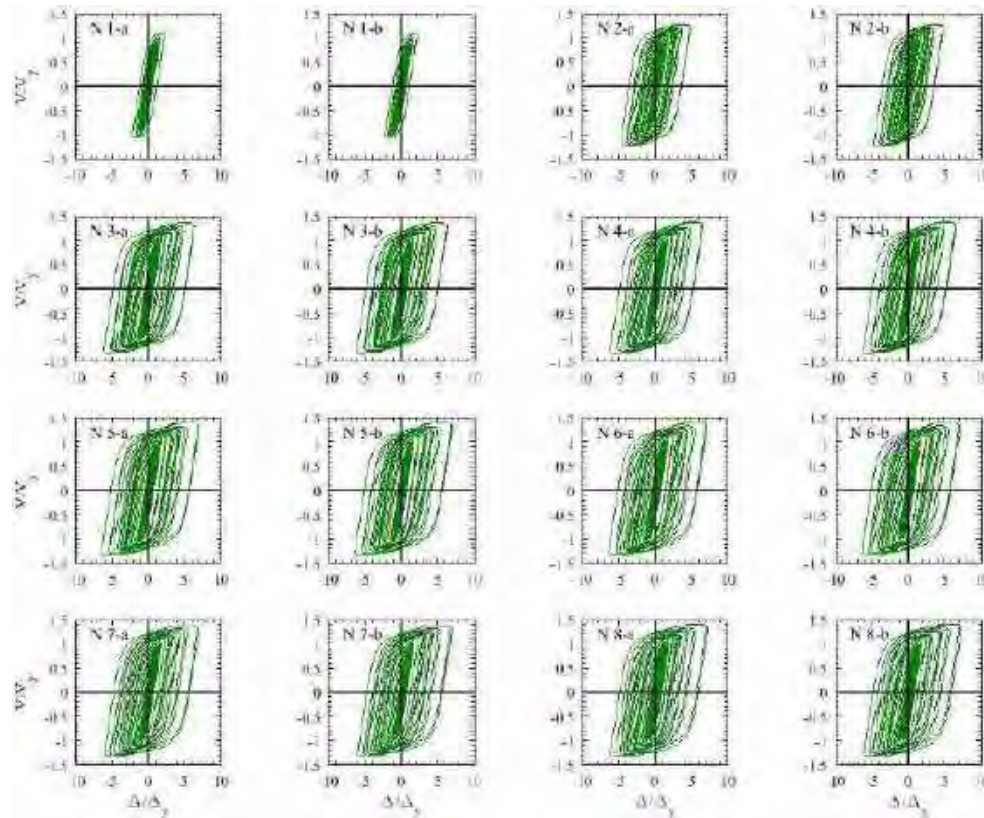


Figura 8.89. Modelo de 24 entresijos con base rígida

En esta sección se presentan los resultados del edificio con 24 entrepisos, el cual representa el modelo más esbelto evaluado en el presente trabajo, y tomando en cuenta su base como infinitamente rígida (figura 8.89). Las respuestas máximas para los dispositivos ADAS y BRBs se presentan para los pares de los registros de aceleración denominados como CJ03 con el caso B y A respectivamente. En las figuras 8.90 y 8.91 se presentan los ciclos histeréticos que desarrollan los dispositivos ADAS con el caso A y B, de donde se observa que todos éstos se encuentran participando de manera no lineal. No obstante, es con el caso B donde los elementos ADAS desarrollan las máximas ductilidades ($\mu_d \geq 8$), en los entrepisos cinco al nueve (figura 8.91). Por otra parte, los ciclos histeréticos de los dispositivos ADAS generados con el caso A de los registros de aceleración CJ03 (figura 8.90), presentan también un excelente comportamiento, aunque las ductilidades locales máximas son menores que con el caso B ($\mu_d < 8$).



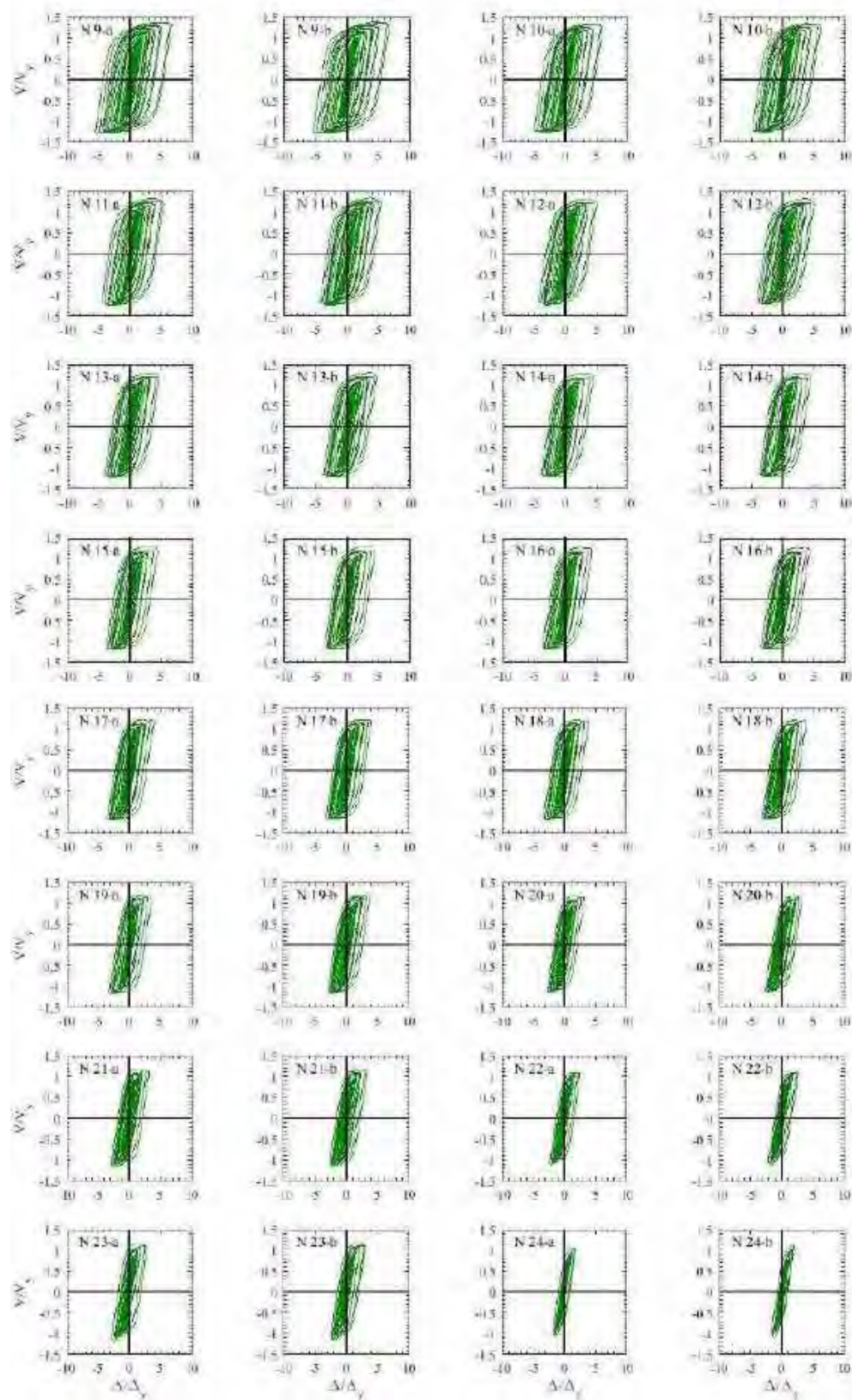
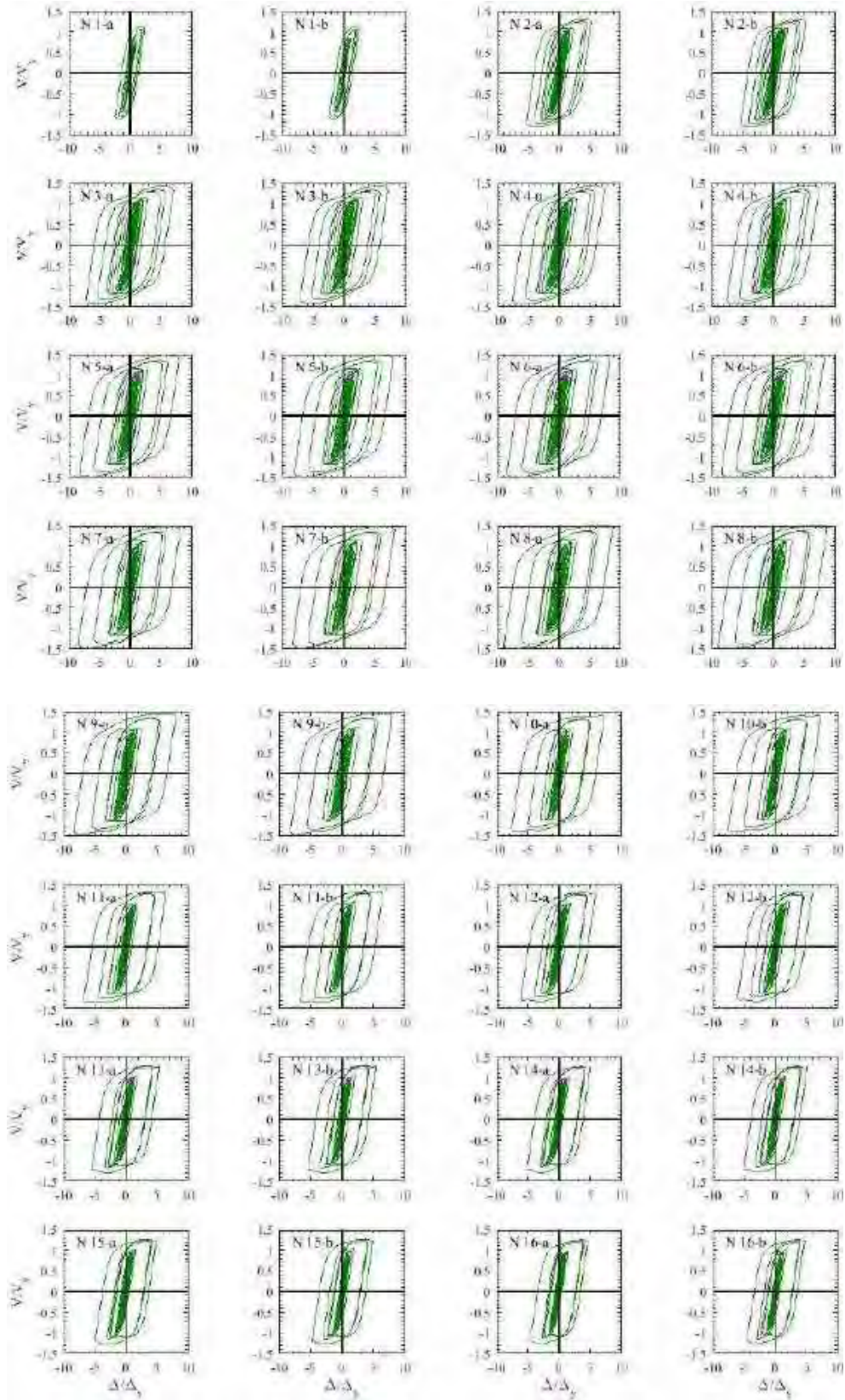


Figura 8.90. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, modelo de 24 entrepisos con base rígida, registros de aceleración CJ03a



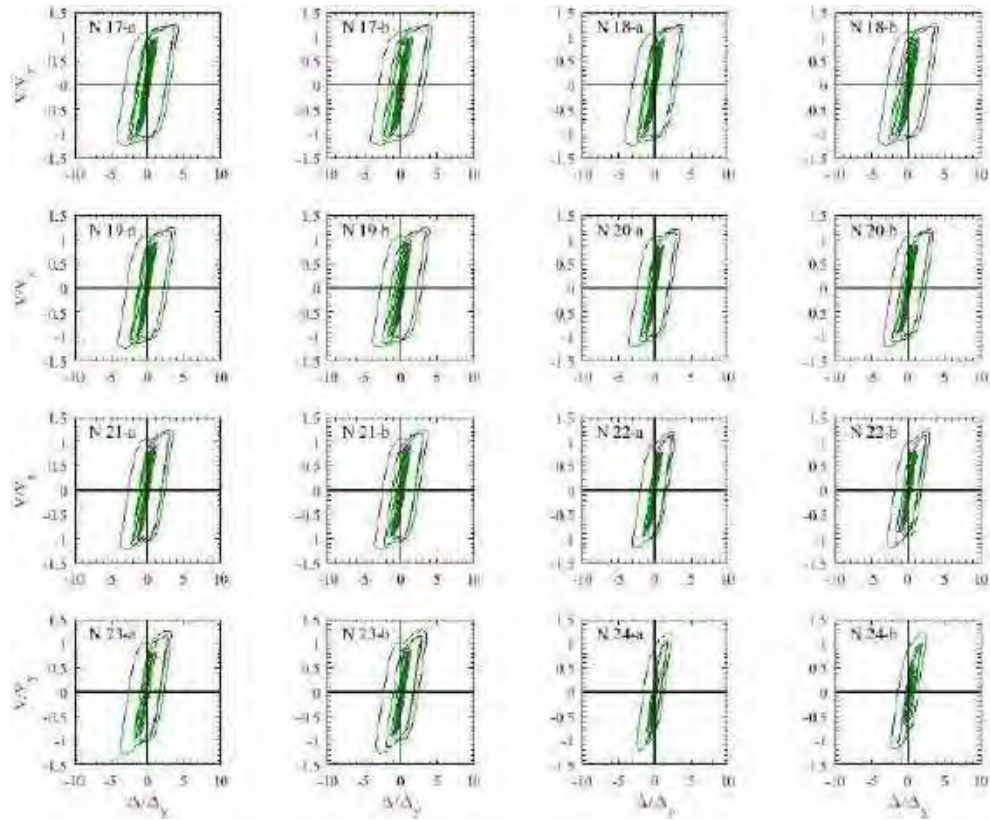
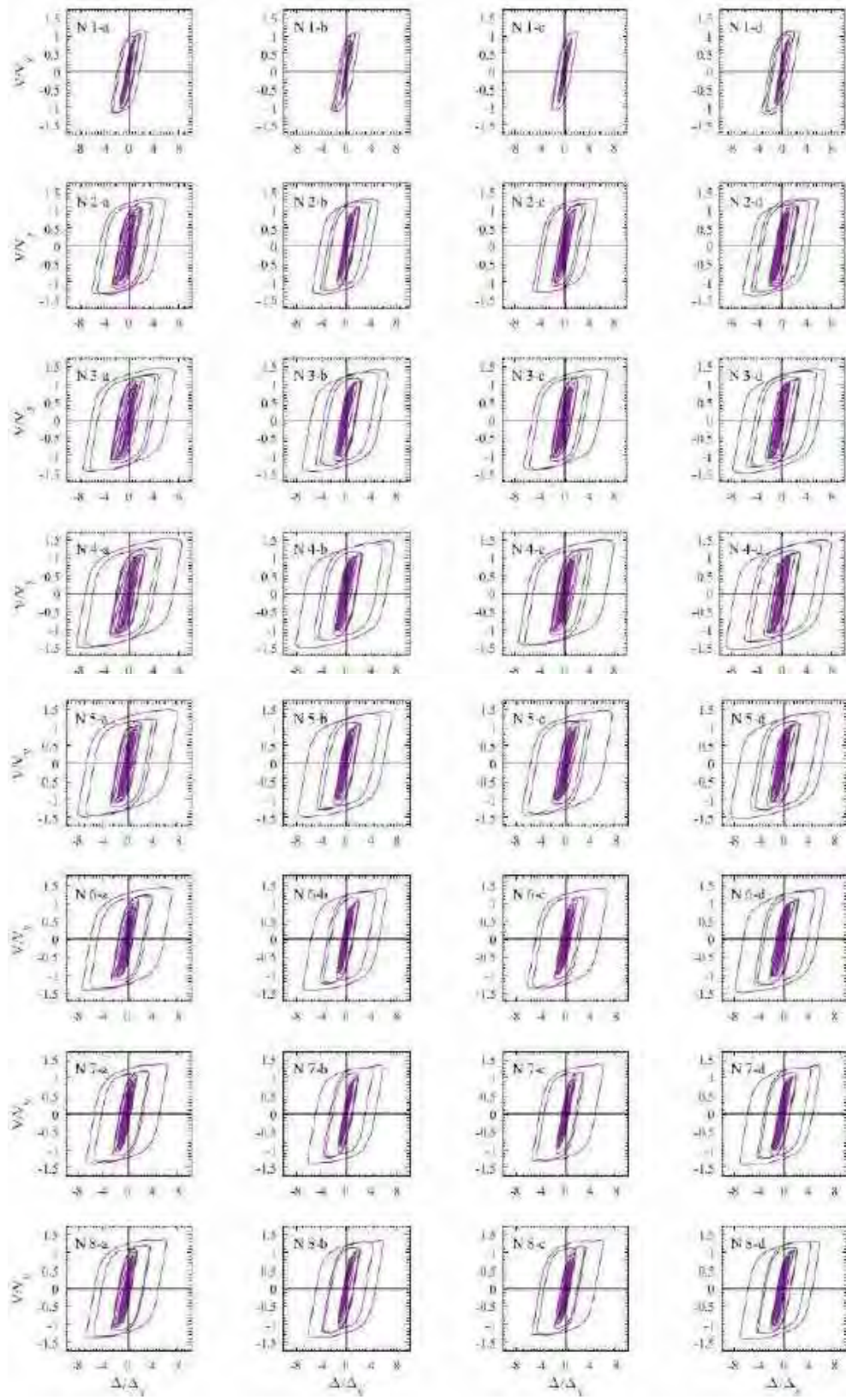
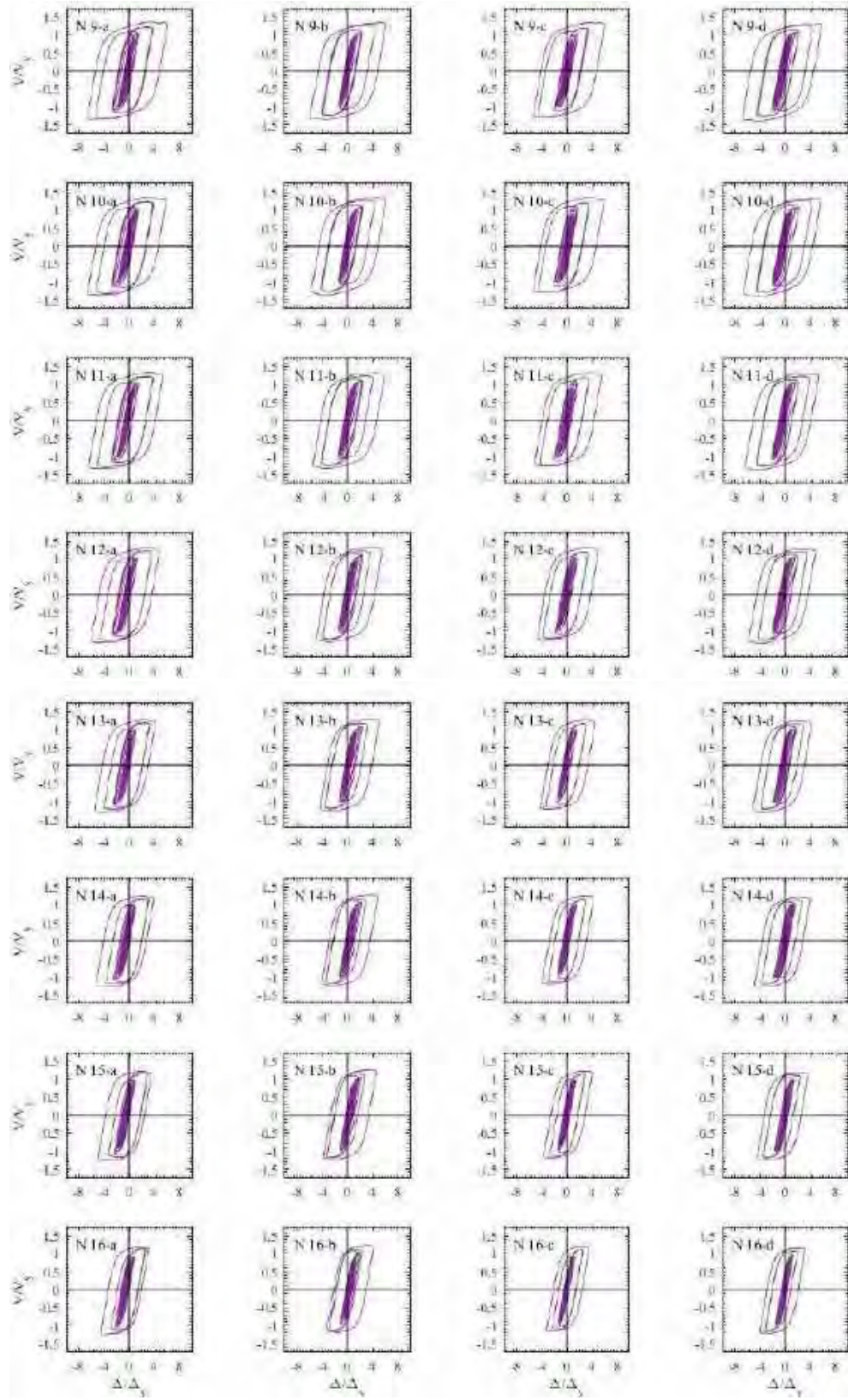


Figura 8.91. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, modelo de 24 entrepisos con base rígida, registros de aceleración CJ03b

Para el caso de los dispositivos BRBs (figuras 8.92 y 8.93), se observa que en los entrepisos tres al siete, la mayoría de los disipadores desarrollan una ductilidad local de $\mu_d \geq 6$; sin embargo, se aprecia que un par dispositivos del último nivel permanecen elásticos para ambos casos evaluados. La respuesta máxima de los BRBs se presenta con el caso A de los registros CJ03, e incluso, gráficamente se observa como los ciclos histeréticos de los dispositivos del cuarto entepiso se sale de los límites establecidos lo que representaría la falla del o de los elementos, dado que desarrolla una ductilidad local de $\mu_d \geq 8$ (figura 8.92).





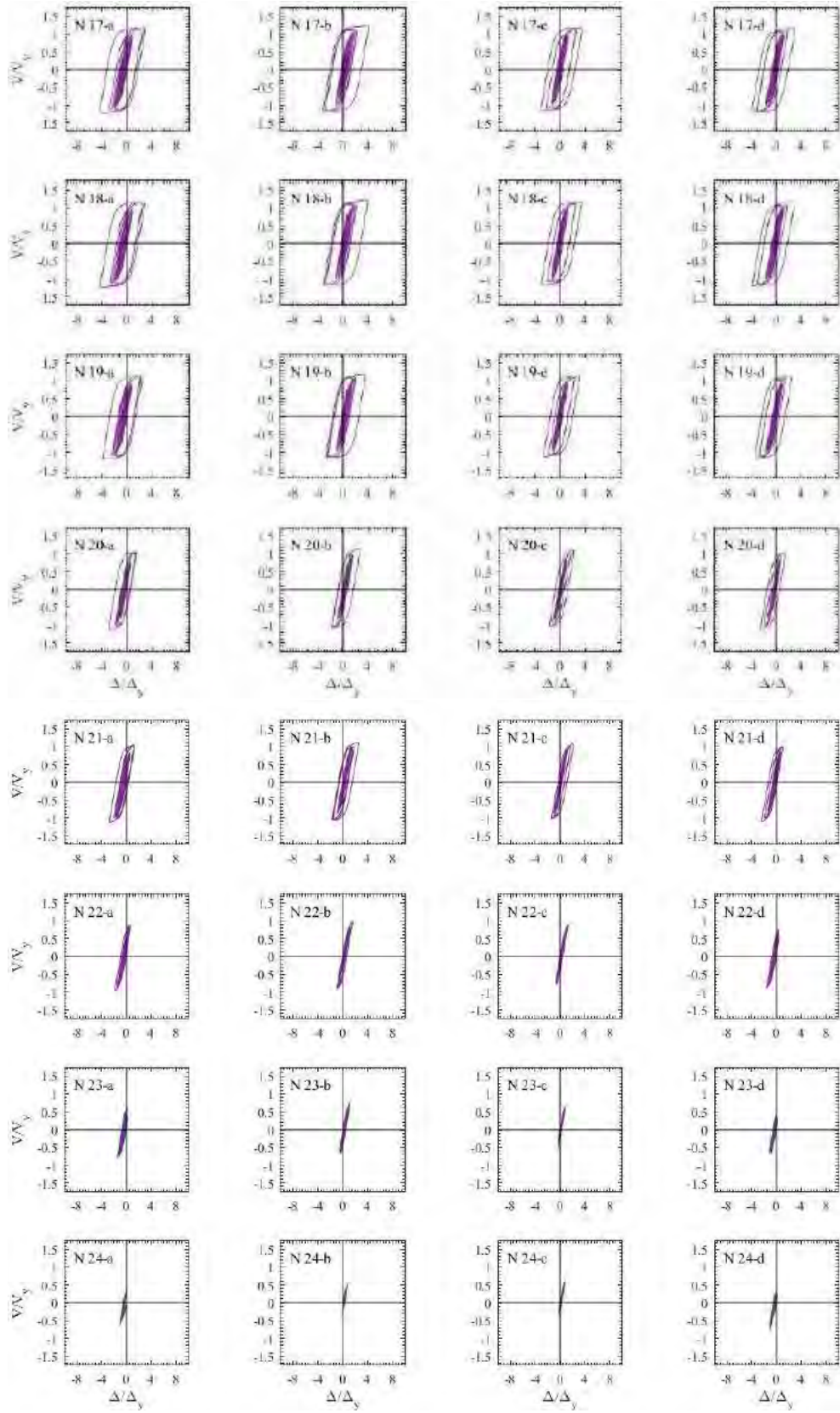
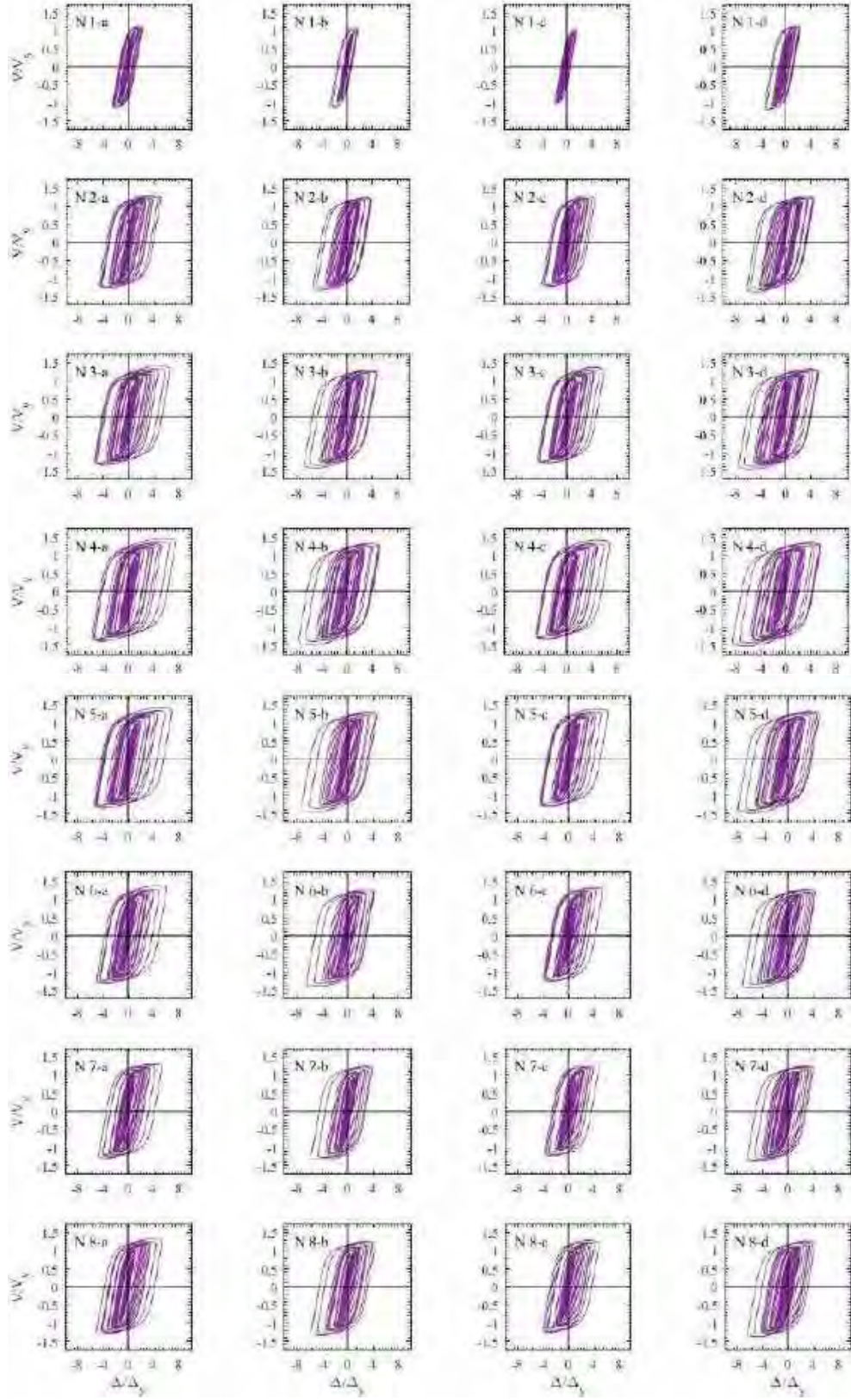
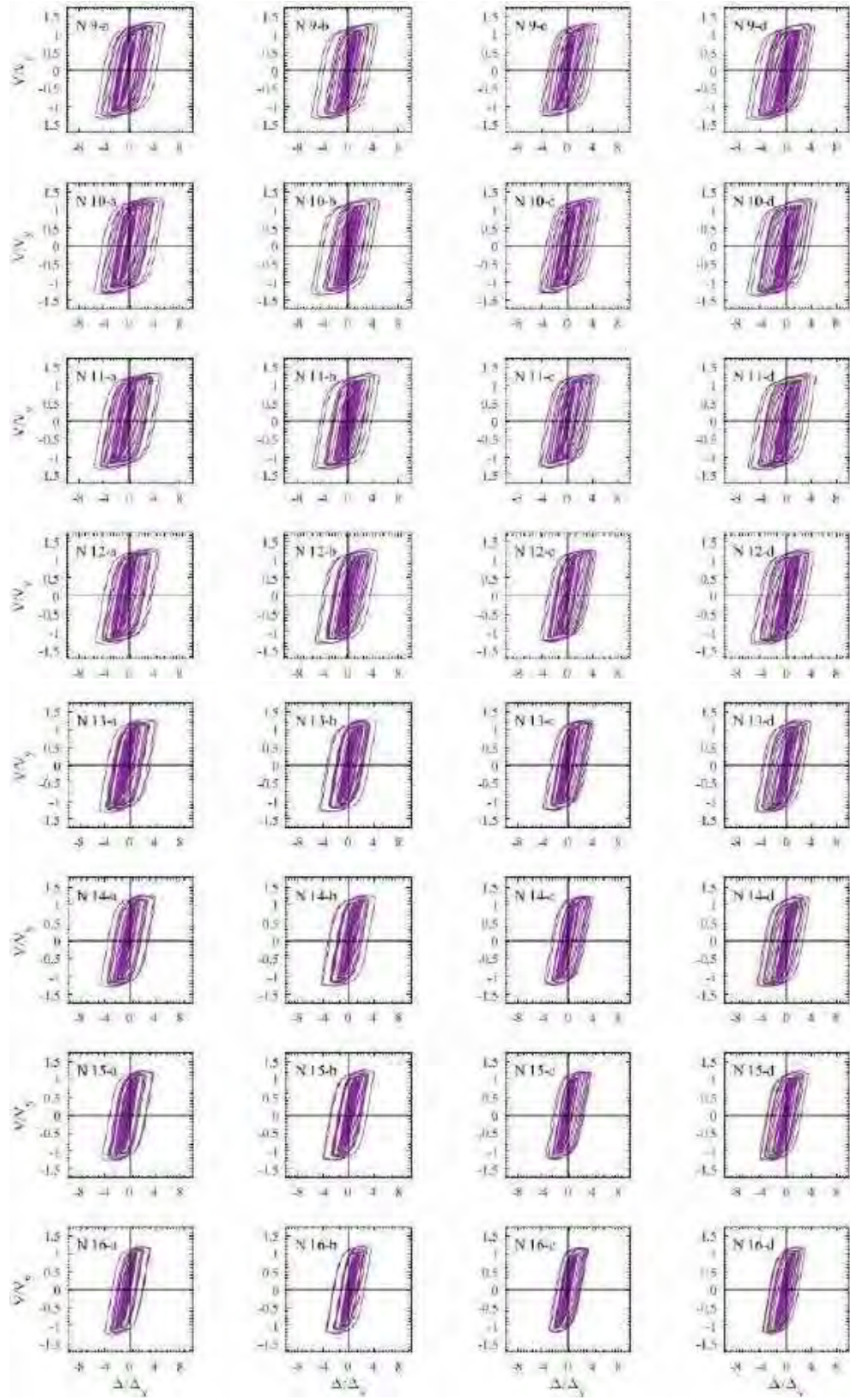


Figura 8.92. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, modelo de 24 entrepisos con base rígida, registros de aceleración CJ03a





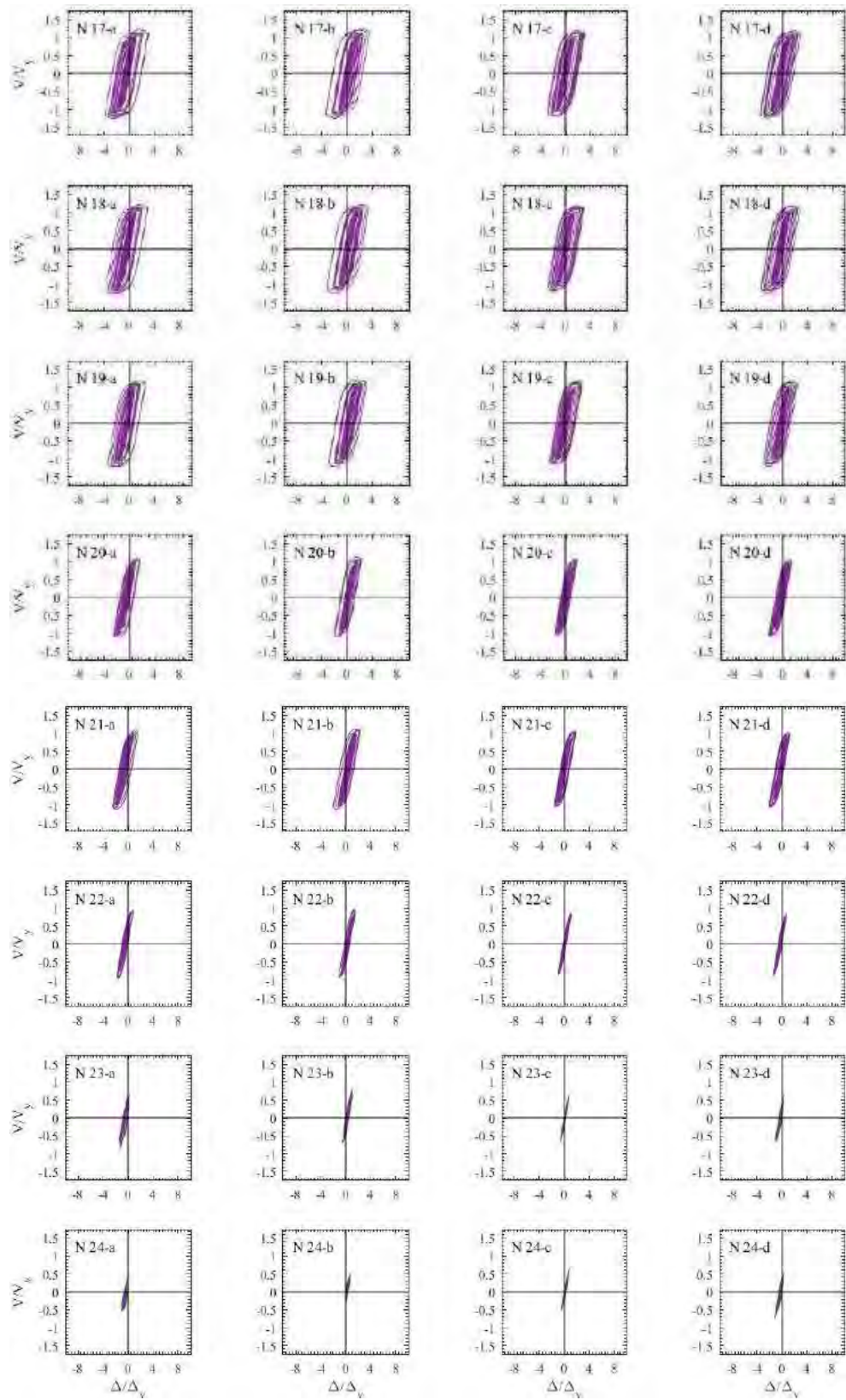
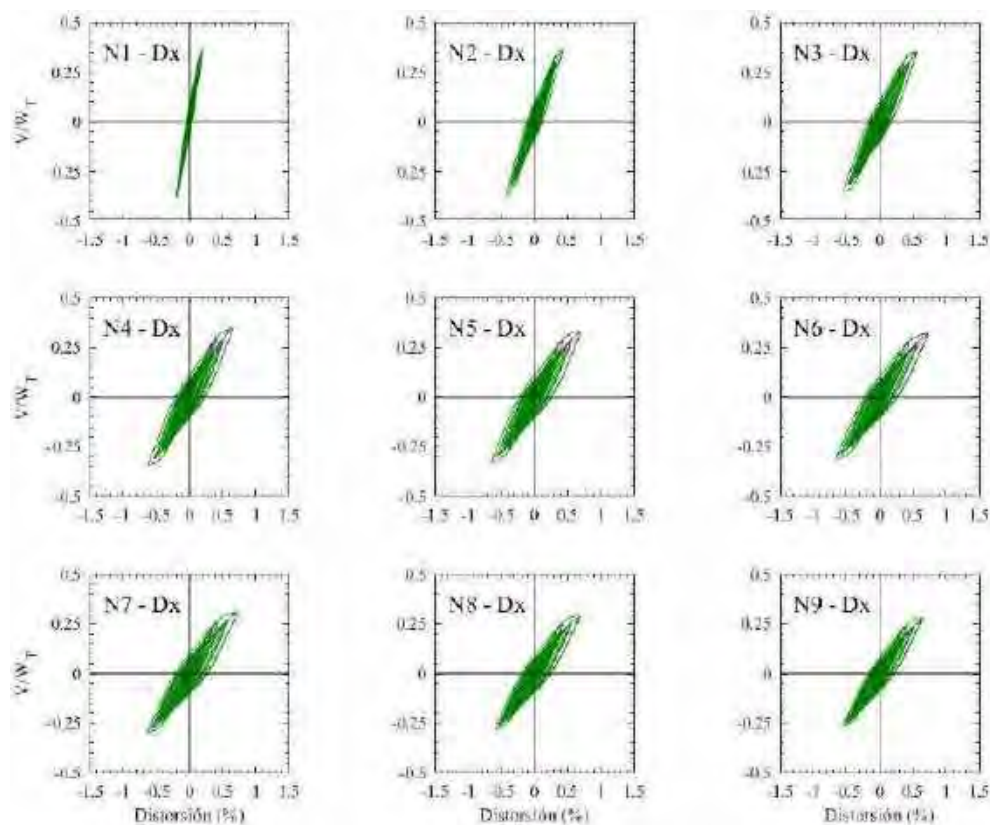


Figura 8.93. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, modelo de 24 entresijos con base rígida, registros de aceleración CJ03b

En las figuras 8.94 a 8.97 se presentan los ciclos histéricos por entrepiso que se desarrollan en la dirección x e y para el edificio con 24 entrepisos y de base rígida. De manera general, se observan que los ciclos histéricos que desarrollan mayores valores de fuerza cortante son los generados por los registros CJ03 para la dirección y , independientemente del caso evaluado. Por otra parte, es perceptible que en la dirección x se desarrollan mayor número de ciclos histéricos con el caso A de los registros CJ03 (figura 8.94), aunque con el caso B del mismo registro se obtienen mayores valores de distorsión (figura 8.95)

Para los ciclos histéricos que se desarrollan en la dirección y con los registros de aceleración CJ03 (figuras 8.96 y 8.97), se observa que el comportamiento es muy similar para ambos casos evaluados, tanto para los valores de cortante como para las distorsiones que se desarrollan. No obstante, evaluando la respuesta global que se desarrollan en esta dirección, se aprecia que es con el caso B donde se presenta un mayor número de ciclos histéricos (figura 8.97). Analizando en conjunto los ciclos de histéresis de los disipadores y de los entrepisos, se relaciona que el número de ciclos histéricos que se generan está altamente vinculado a la magnitud de ductilidad local que desarrollan los disipadores de energía, esto se debe entre otras cosas, a que la respuesta no lineal de las vigas es incipiente y que los primeros elementos que fluyen son los disipadores de energía en ambas direcciones.



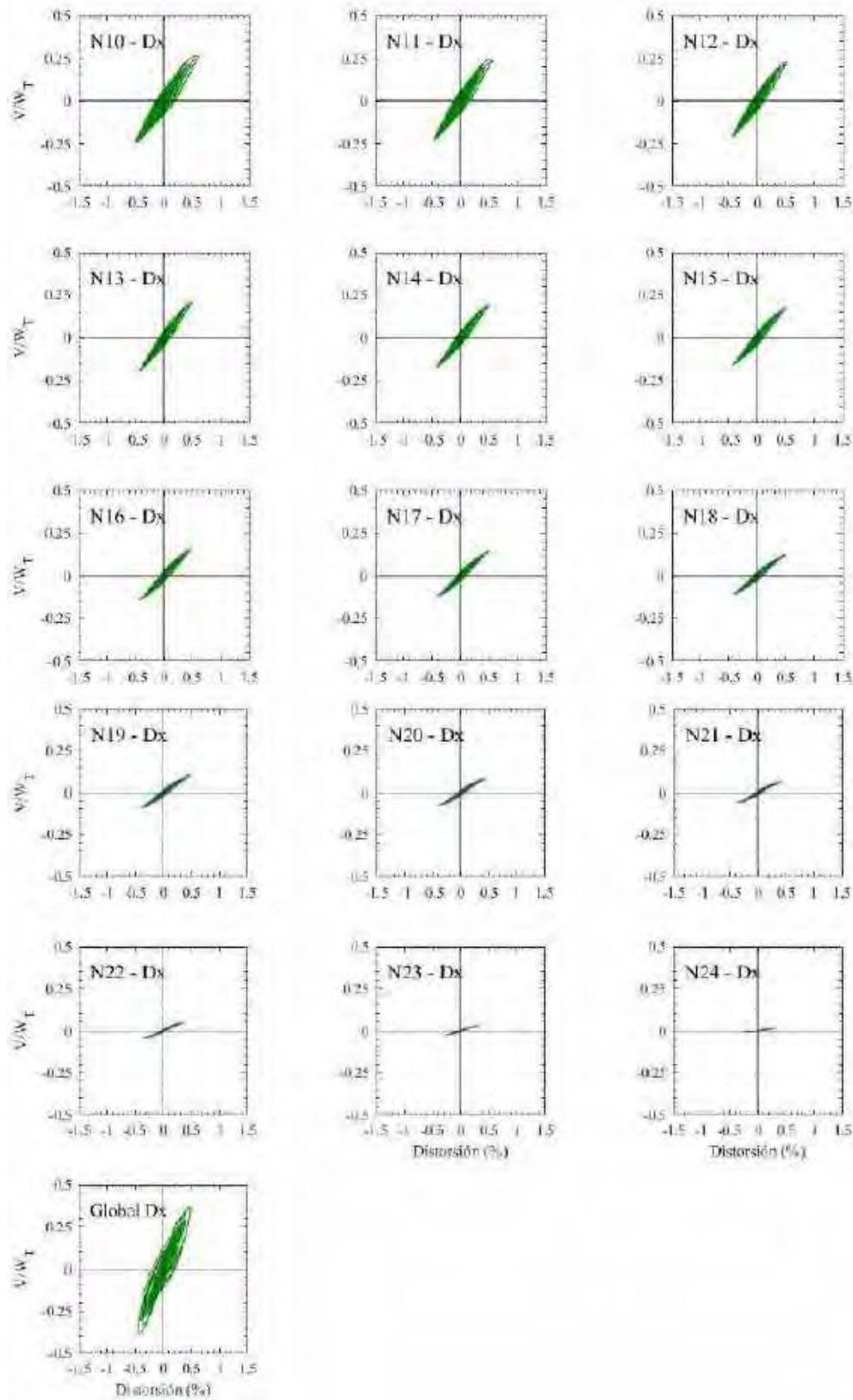
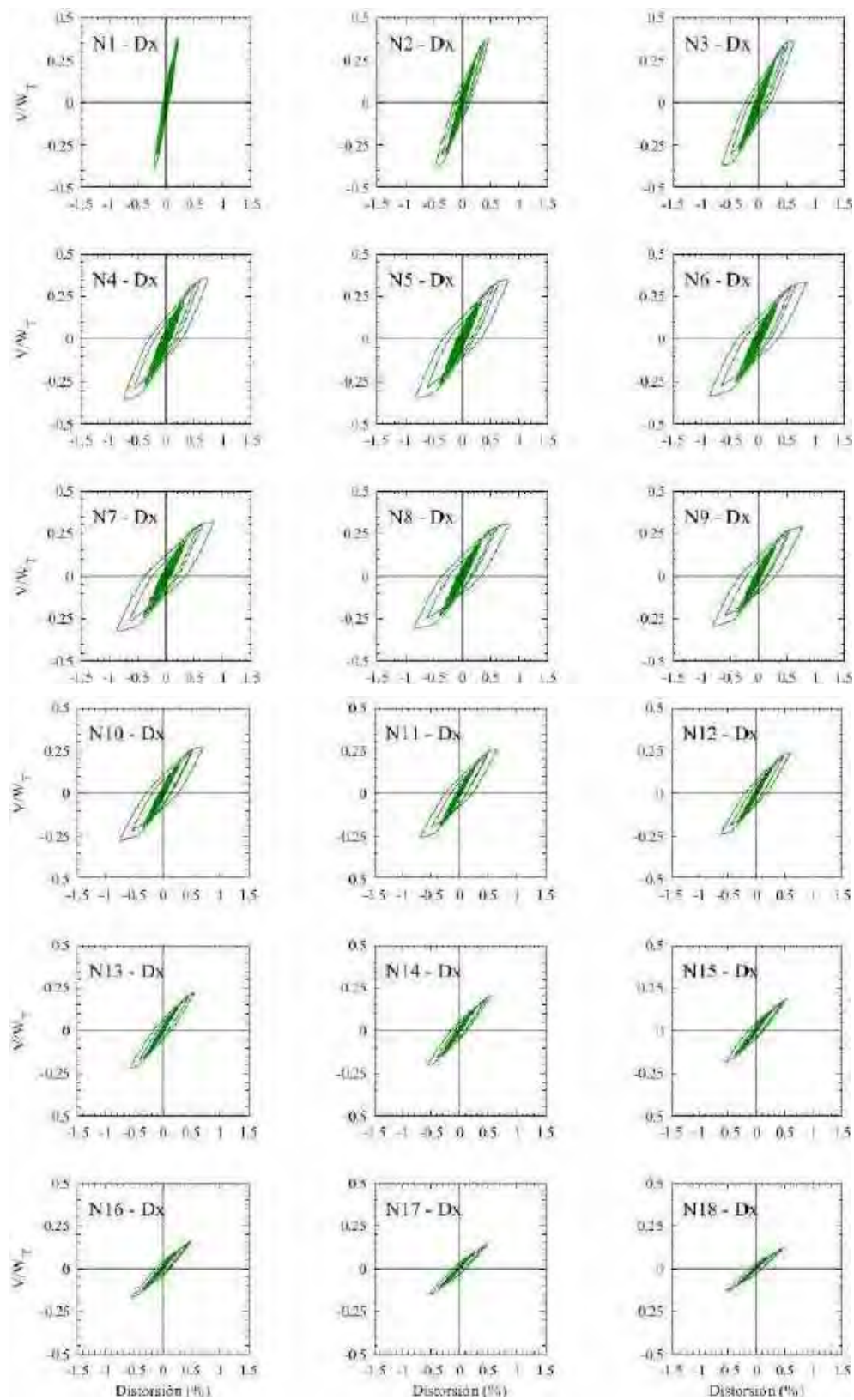


Figura 8.94. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, para el modelo de 24 niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03a



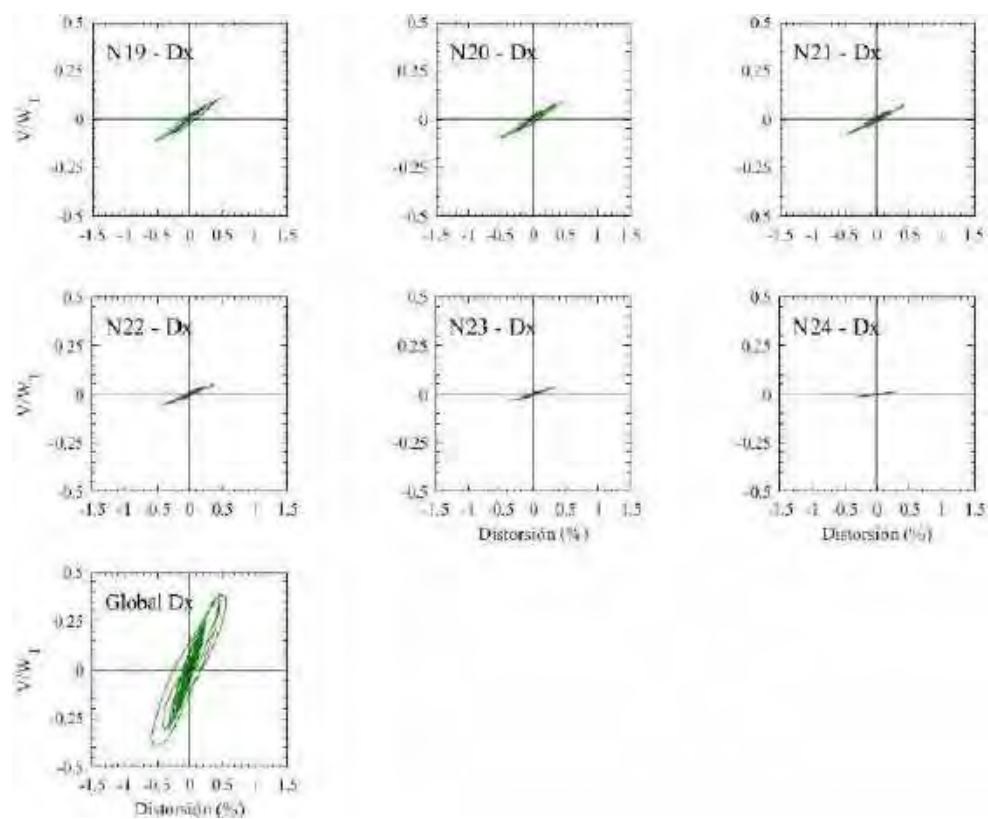
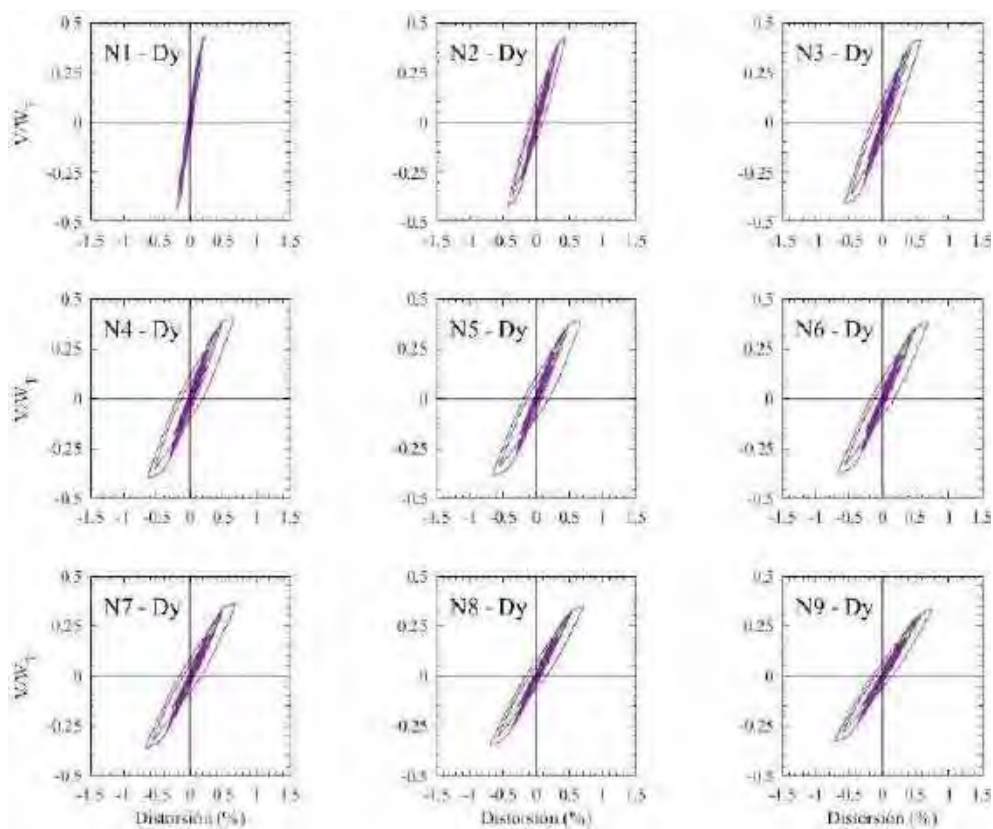


Figura 8.95. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, para el modelo de 24 niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03b



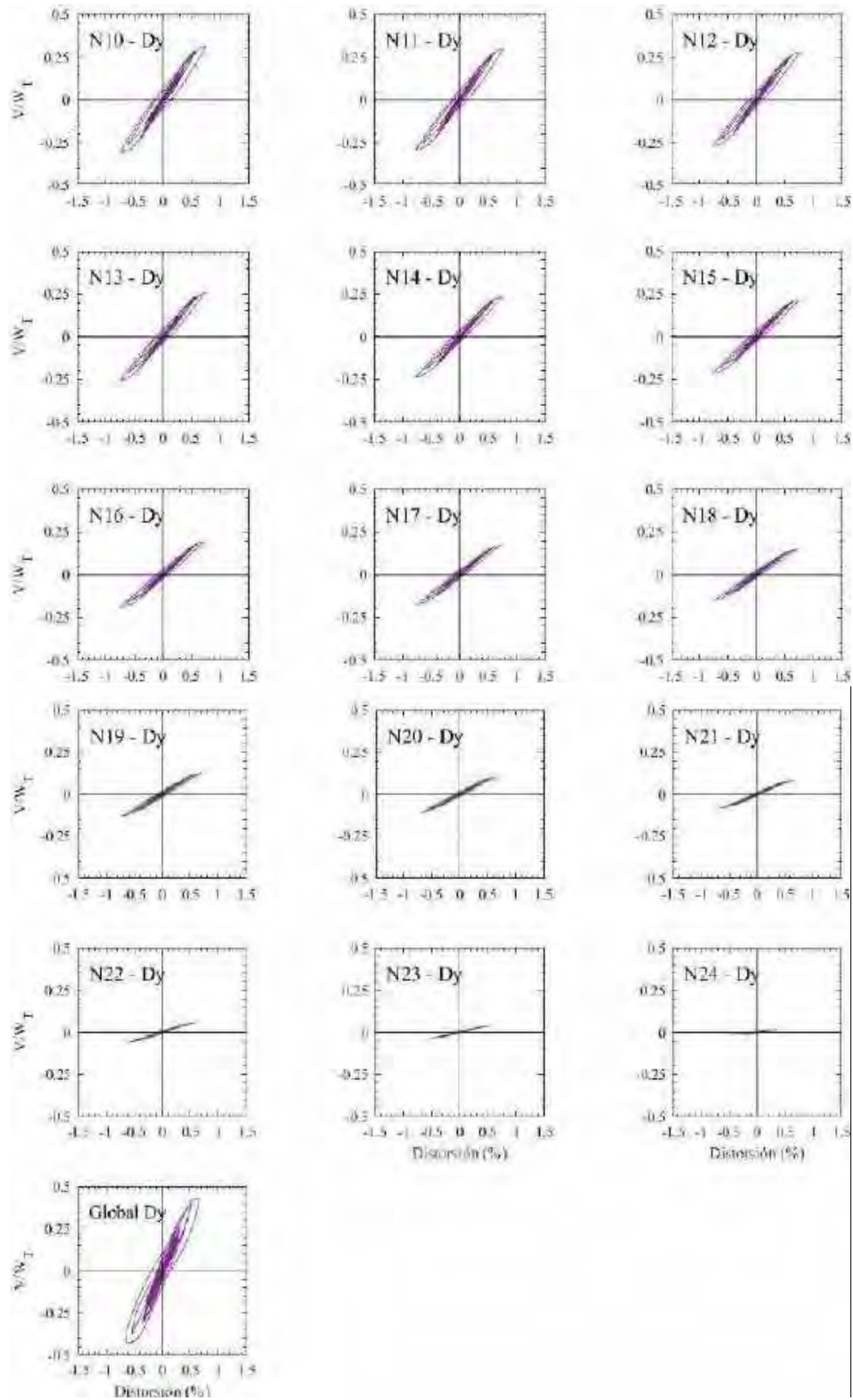
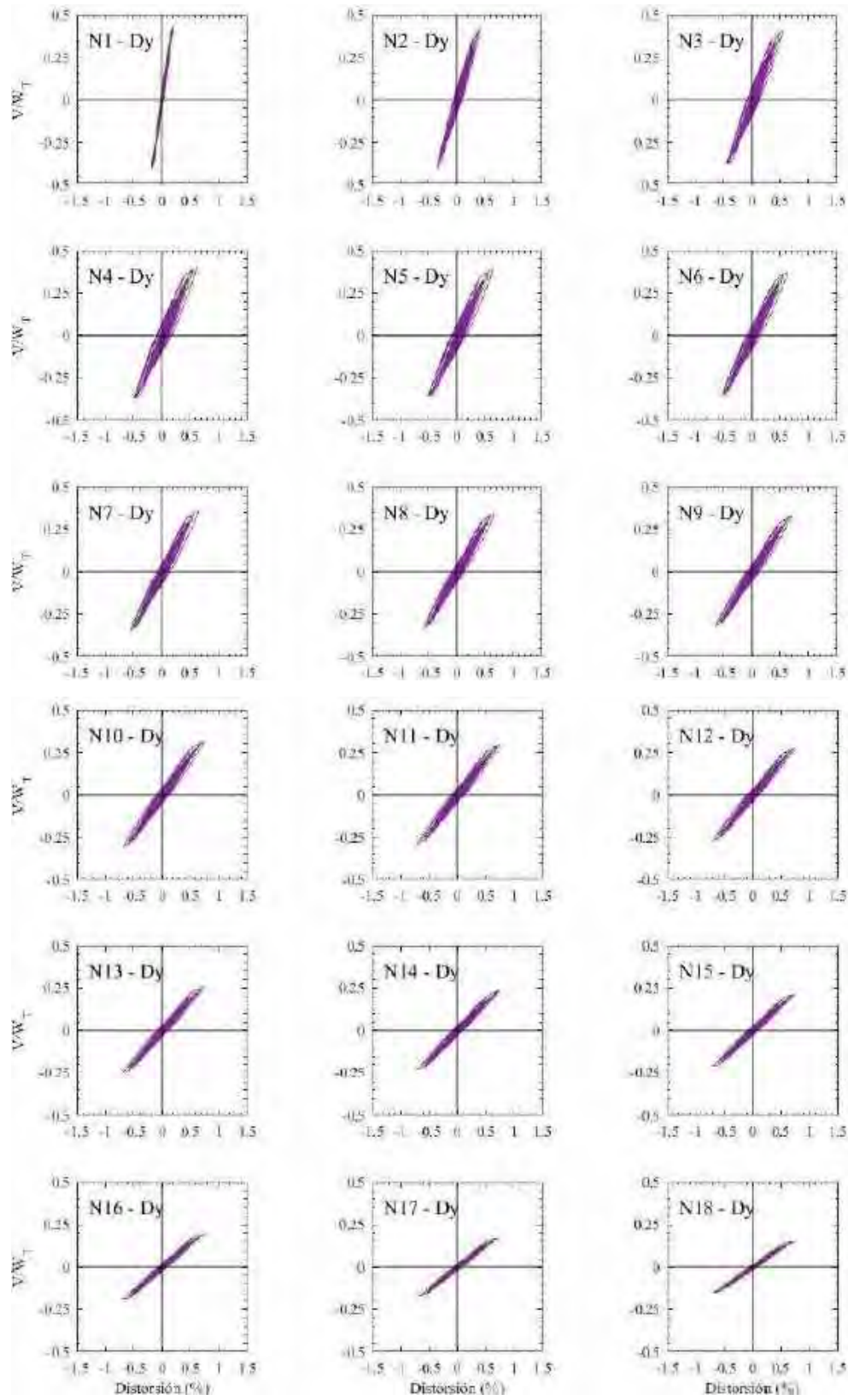


Figura 8.96. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, para el modelo de 24 niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03a



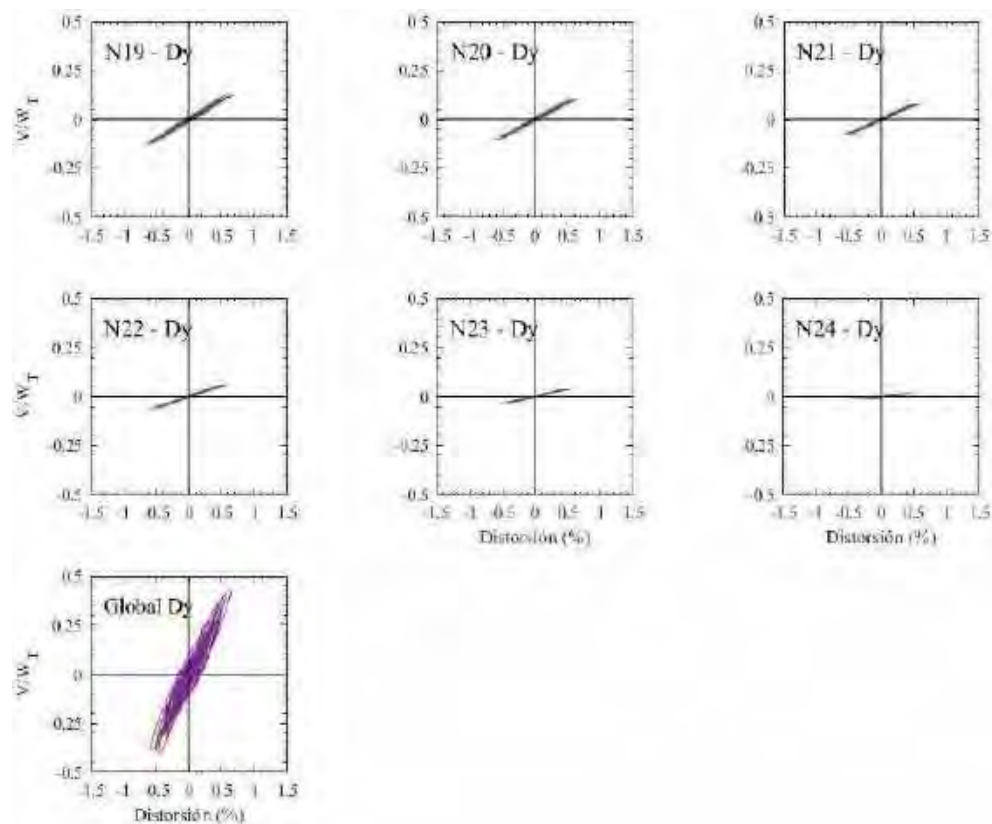


Figura 8.97. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, para el modelo de 24 niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03b

En las figuras 8.98 a 8.101 se presentan los mapeos de fluencias inelásticas obtenidos con los registros de aceleración CJ03 para las dos direcciones de análisis del modelo más esbelto evaluado con base rígida. En la figura 8.99 se aprecia el comportamiento inelástico máximo para los disipadores ADAS, obtenido con el caso B de los registros de aceleración CJ03. Se aprecia de ésta que los disipadores de los entrepisos cinco al nueve se presentan las mayores ductilidades locales de los dispositivos ($\mu_d \geq 8$). Por otro lado, con el caso A del mismo par de registros, los disipadores de energía desarrollan ductilidades del orden de $\mu_d < 8$ (figura 8.98).

En las figuras 8.100 y 8.101 se presentan los mapeos de fluencias para la dirección y con el mismo par de registros de aceleración antes mencionados. A pesar que los BRBs no desarrollan su ductilidad máxima, la mayoría de los dispositivos fluyen, con excepción de un par en el último entrepiso. Con el caso A de los registros de aceleración CJ03, se presentan las máximas demandas para los dispositivos BRB, donde más del 30% del total de dispositivos desarrollan ductilidades de $\mu_d \geq 6$, sobre todo en los entrepisos tres al diez (figura 8.100). Con el caso B del mismo par de registros, los dispositivos BRB siguen desarrollando los mismos niveles de ductilidad local aunque en menor proporción, dado que sólo el 20% de éstos alcanzan ductilidades de $\mu_d \geq 6$, focalizados en los entrepisos tres a siete (figura 8.101).

Como se ha visto con los otros edificios evaluados, en los entrepisos donde los disipadores desarrollan sus máximas ductilidades, la rotación de las vigas en dichos entrepisos tiende a aumentar también. Para este modelo en particular, se observa que para la dirección x , los niveles de fluencia máxima son de menos del 10% de la rotación última de dichos elementos, mientras que para la dirección y , las magnitudes de rotación aumentan aunque siguen siendo menores al 15% de la rotación última, y se encuentran ubicadas de manera exclusiva en los marcos exteriores (figuras 8.100 y 8.101).

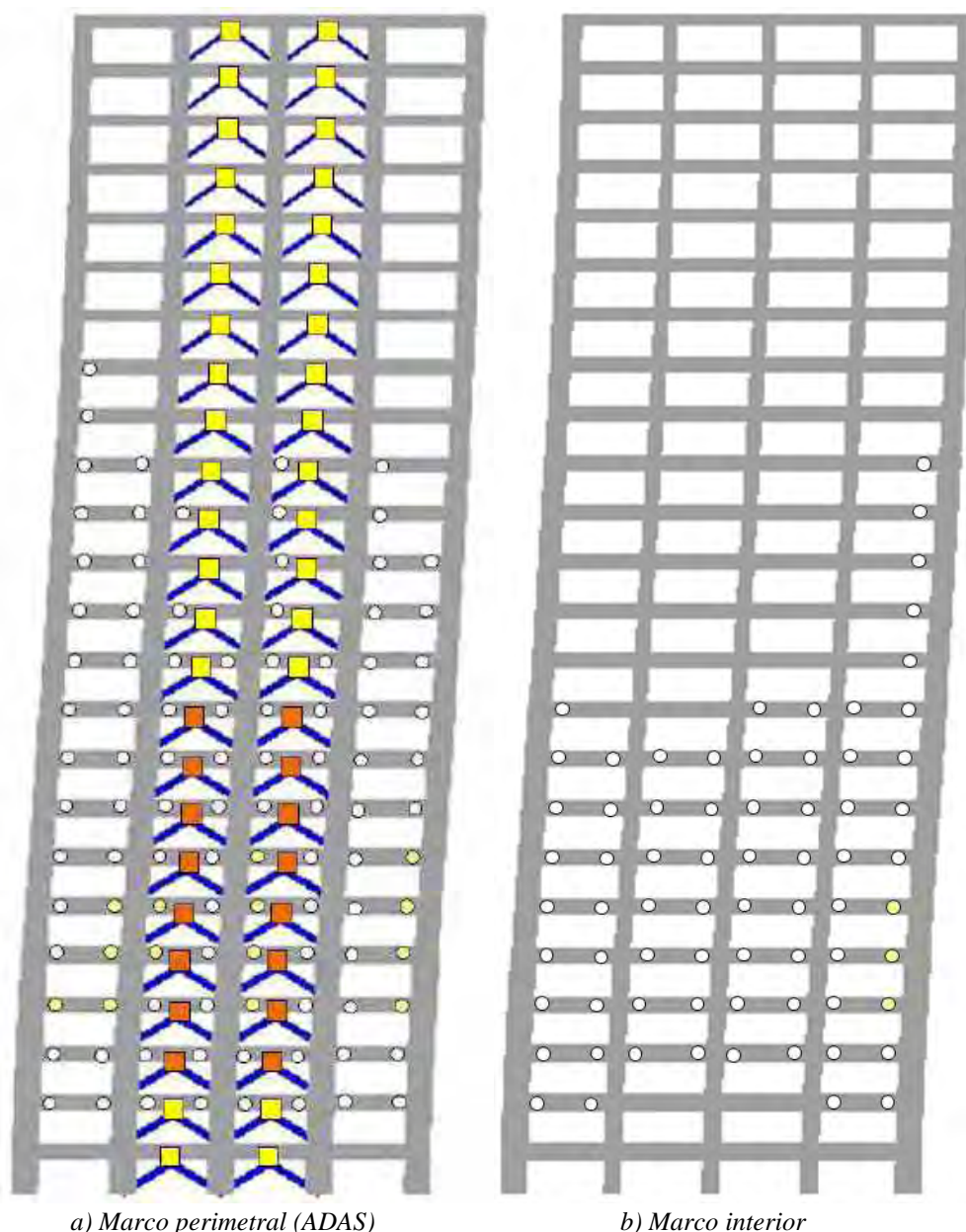
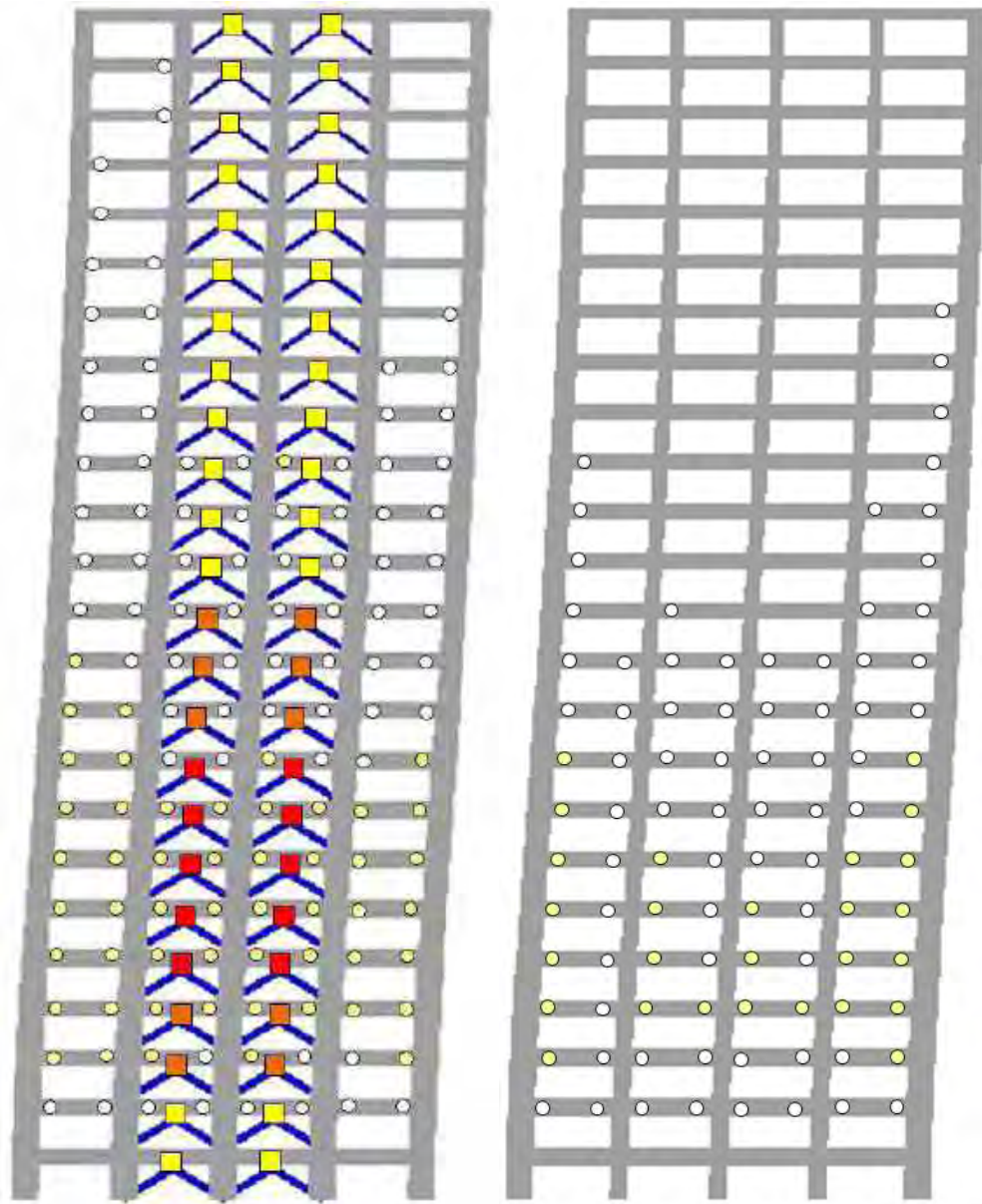


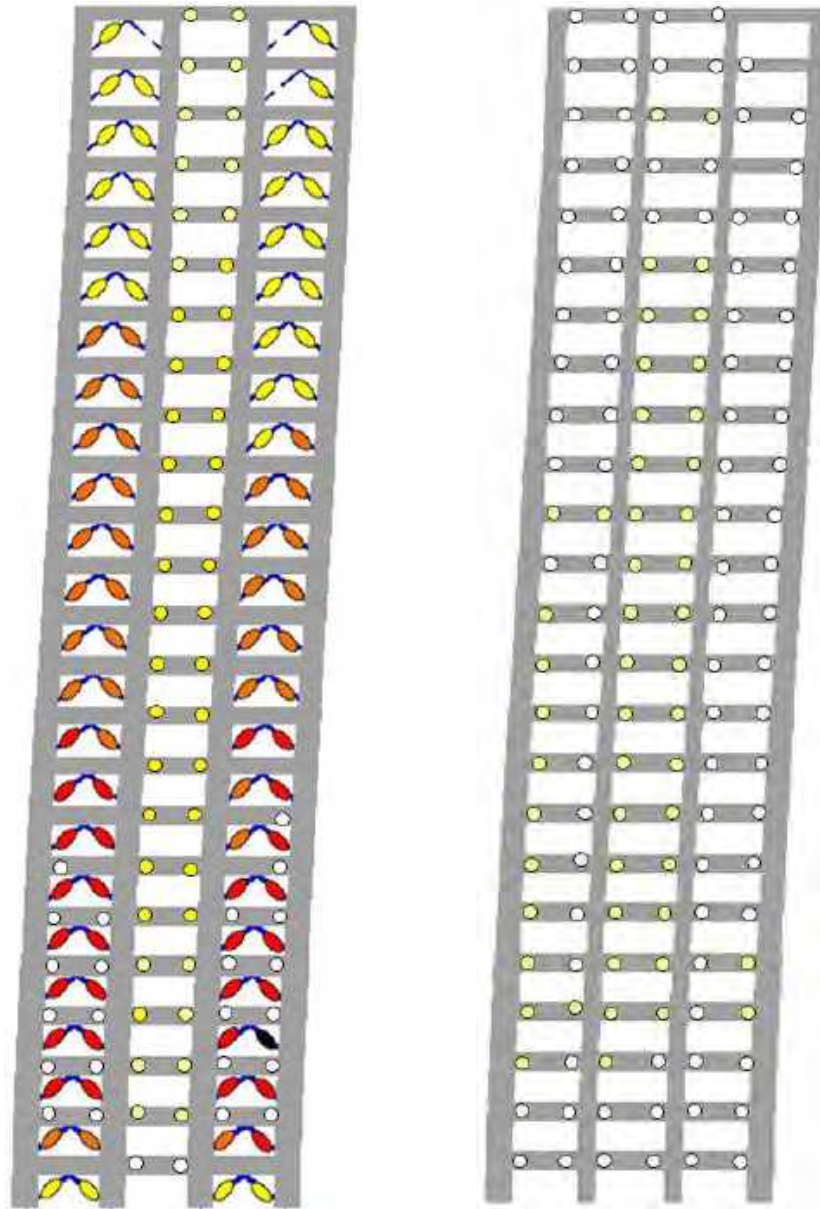
Figura 8.98. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección x , para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03a



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

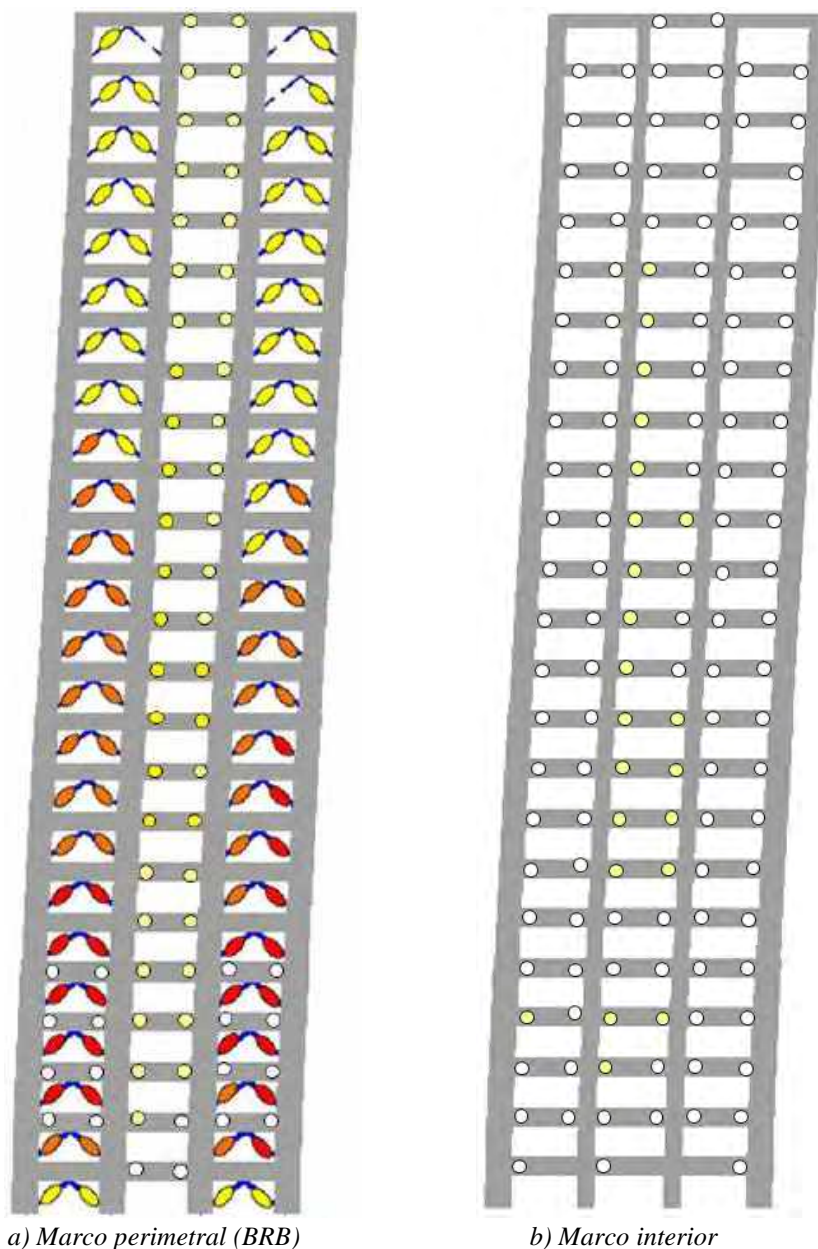
Figura 8.99. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección x , para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03b



a) Marco perimetral (BRB)

b) Marco interior

Figura 8.100. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección y, para el modelo de 24 niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03a

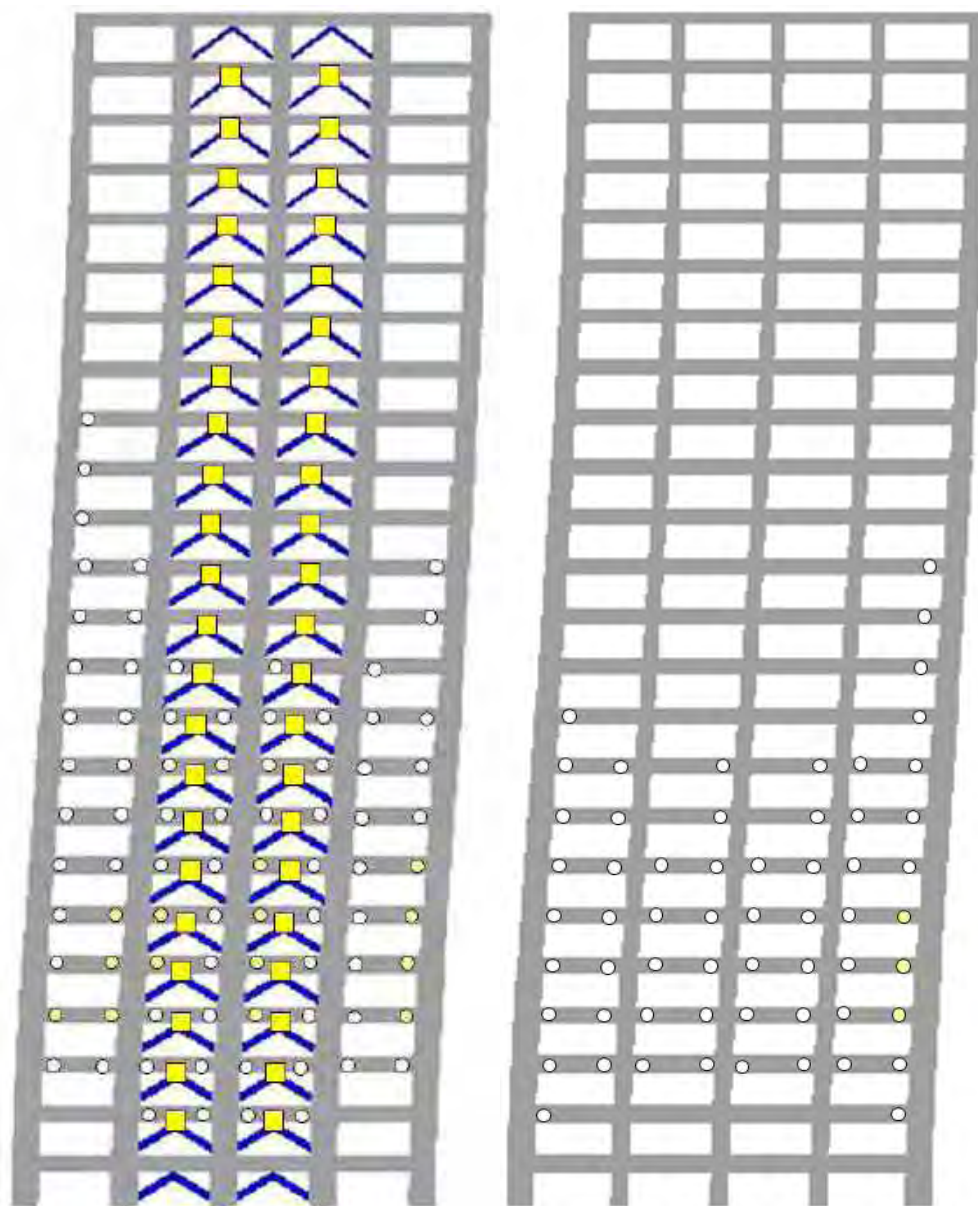


a) Marco perimetral (BRB)

b) Marco interior

Figura 8.101. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03b

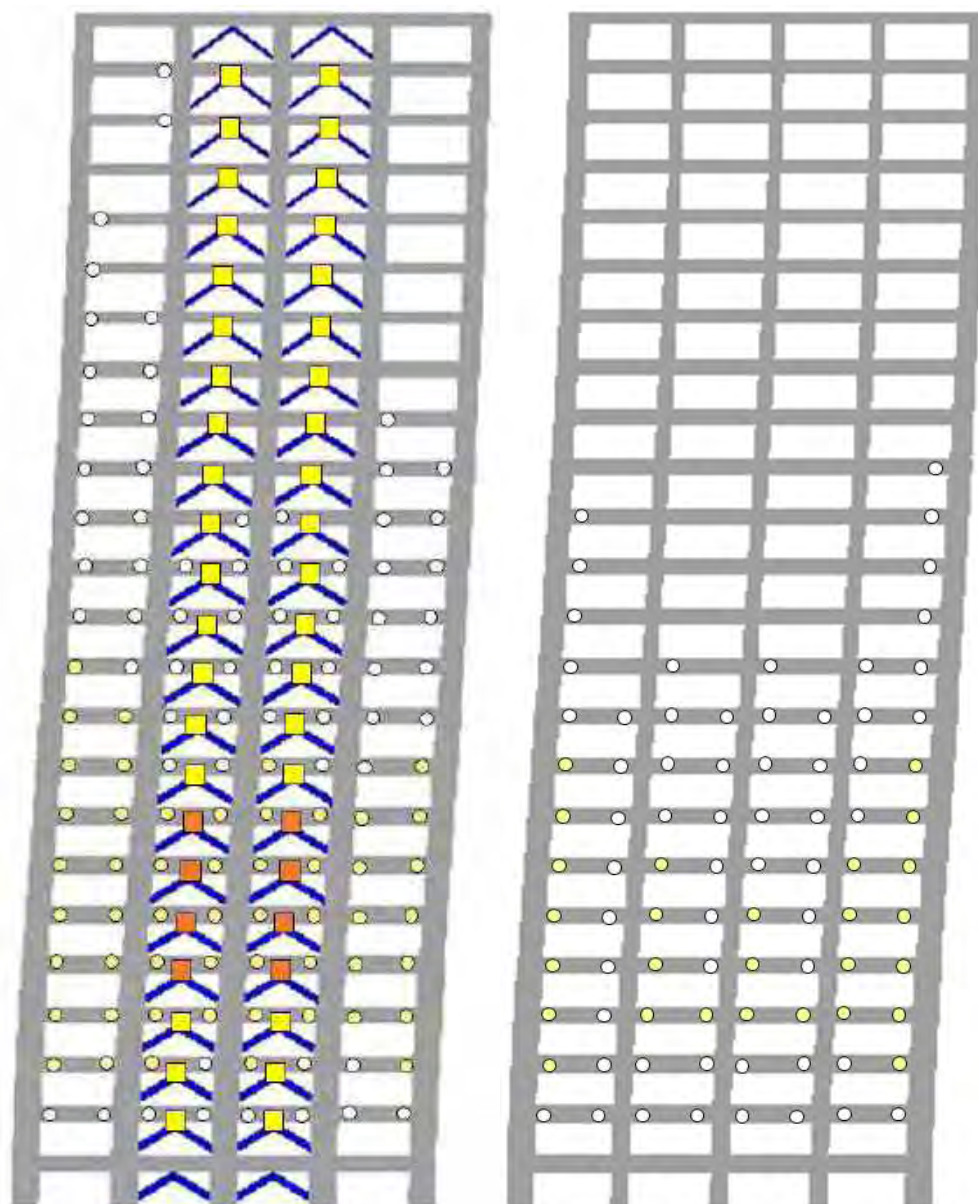
En las figuras 8.102 a 8.105 se presentan los mapeos de fluencias inelásticas residuales de los modelos de 24 entresijos con base rígida. Se aprecia de éstas que no se presenta un cambio significativo en las magnitudes entre las rotaciones máximas y las residuales, incluso ni para los marcos interiores (figuras 8.102 y 8.103). Por otra parte, en la dirección y se observa que la rotación residual máxima en los marcos interiores es de menos del 10% de la rotación última, e incluso, dicho valor se reduce a menos del 5% de la rotación última para los marcos interiores (figuras 8.104 y 8.105).



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

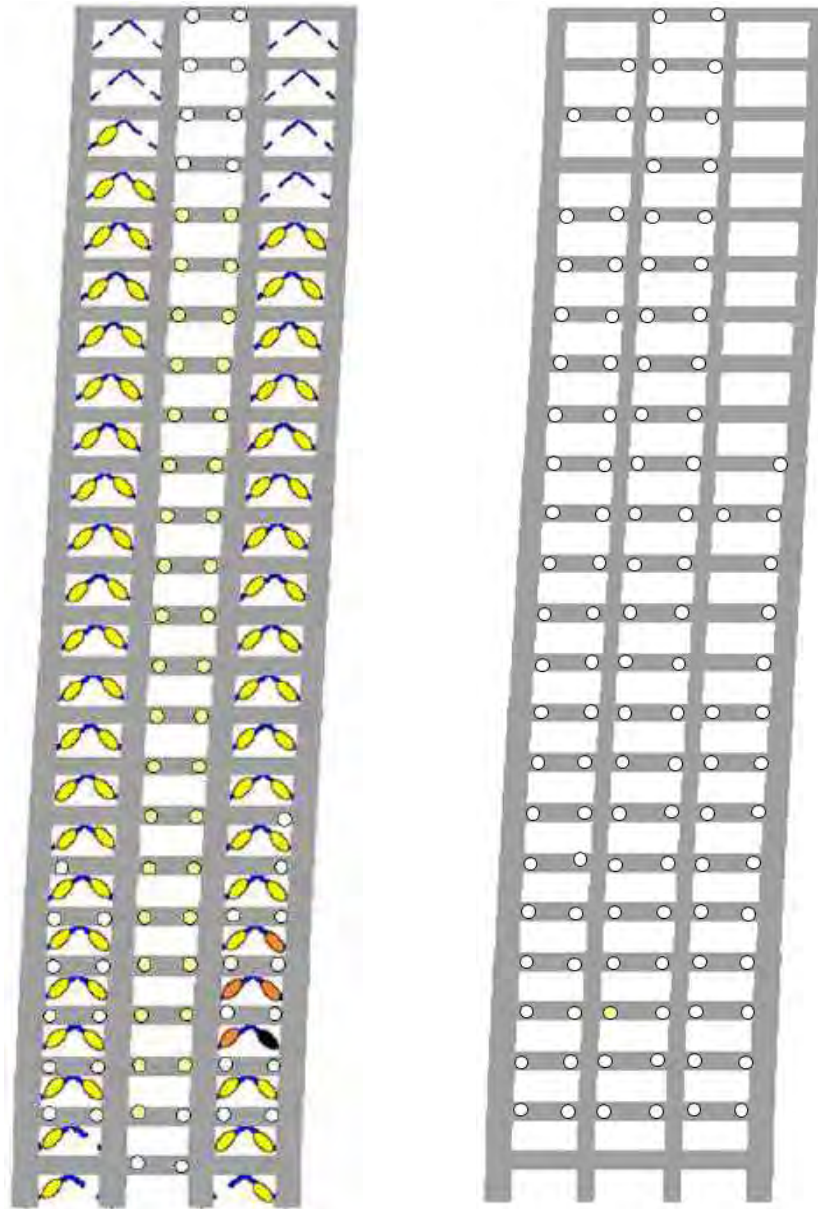
Figura 8.102. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección x , para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03a



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

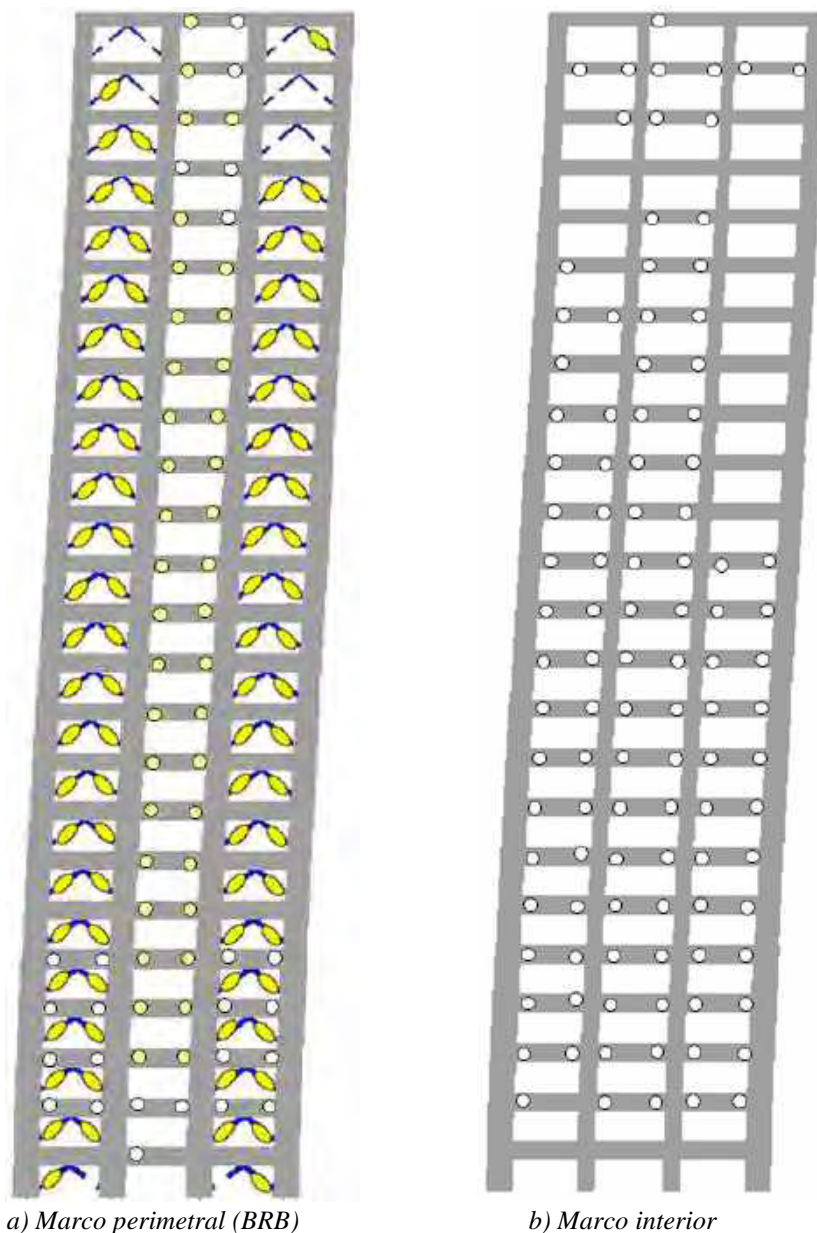
Figura 8.103. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección x, para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03b



a) Marco perimetral (BRB)

b) Marco interior

Figura 8.104. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03a



a) Marco perimetral (BRB) b) Marco interior
 Figura 8.105. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección y, para el modelo de ocho niveles con base rígida, registros de aceleración CJ03b

En la figura 8.106 se presentan los ciclos histeréticos que desarrollan las vigas con los mayores valores de rotación, cuando los disipadores de energía alcanzan sus ductilidades máximas. De esta manera, se aprecia que para la dirección x, las vigas de los primeros entresijos presentan los mayores valores de rotación aunque éstas son menores del 10% de la rotación última (V1x). Las vigas en dirección y son las que presentan los mayores valores de rotación para el modelo de 24 niveles con base rígida. De esta manera, se observa en la figura 8.106b que el comportamiento no lineal más desfavorable se presenta para las vigas de los niveles 14 al 17 identificados con el nombre V4y, y éstos se presentan exclusivamente en las crujeías intermedias de los marcos exteriores para ambos casos de análisis (figuras 8.100 y 8.101).

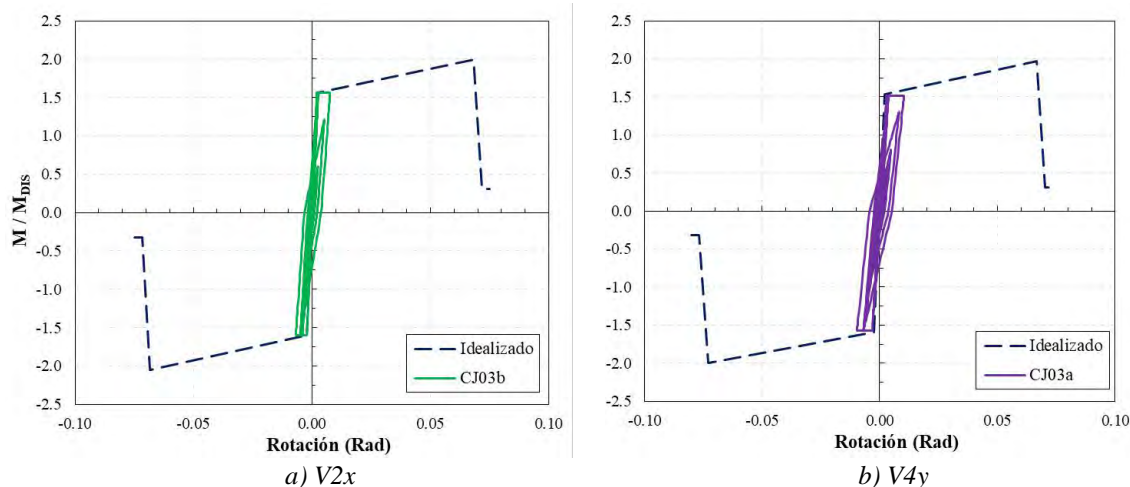


Figura 8.106. Máximas rotaciones en vigas para el edificio de 24 entrepisos con base rígida

8.6.2 Base flexible

A continuación se presentan los resultados del edificio con 24 entrepisos tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura y modelando cinco niveles de sótano (figura 8.107). En primera instancia, las respuestas máximas que se presentan para los dispositivos ADAS y BRBs son las mismas que se presentaron para el edificio con base rígida (registros CJ03). En las figuras 8.108 y 8.109 se presentan los ciclos histeréticos que desarrollan los dispositivos ADAS para el caso A y B respectivamente. Se observa para ambos casos que más del 30% del total de disipadores desarrollan ductilidades de $\mu_d \geq 8$, e incluso con el caso B, los dispositivos ubicados en los entrepisos seis a nueve, presentan ductilidades mayores a las máximas con las que fueron diseñadas (figura 8.109).

Para el caso de la dirección y, se observa una mayor participación no lineal por parte de los dispositivos de disipación de energía, dado que más del 45% de éstos desarrollan ductilidades locales de $\mu_d \geq 6$ (figuras 8.110 y 8.111). Sin embargo, es con el caso A de los registros de aceleración CJ03, donde el 65% del total de BRBs presentan ductilidades $\mu_d \geq 6$ (figura 8.110), y el 44% del total de dispositivos usados llegarían a desarrollar ductilidades mayores para las que fueron diseñados ($\mu_d \geq 8$), y se encuentran ubicados del entrepiso tres a trece. Aunque con el caso B se presentan también una gran cantidad de ciclos histeréticos inelásticos en la mayoría de los disipadores, la cantidad de dispositivos que desarrollan ductilidades de $\mu_d \geq 8$ son menores que con el caso A, y éstos se encuentran desde el entrepiso tres al diez (figura 8.111).

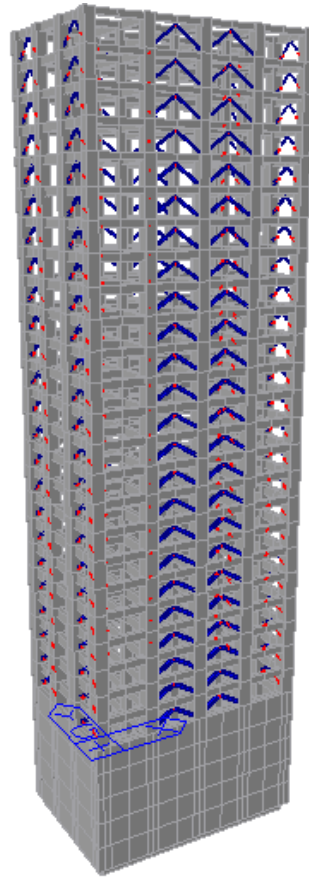
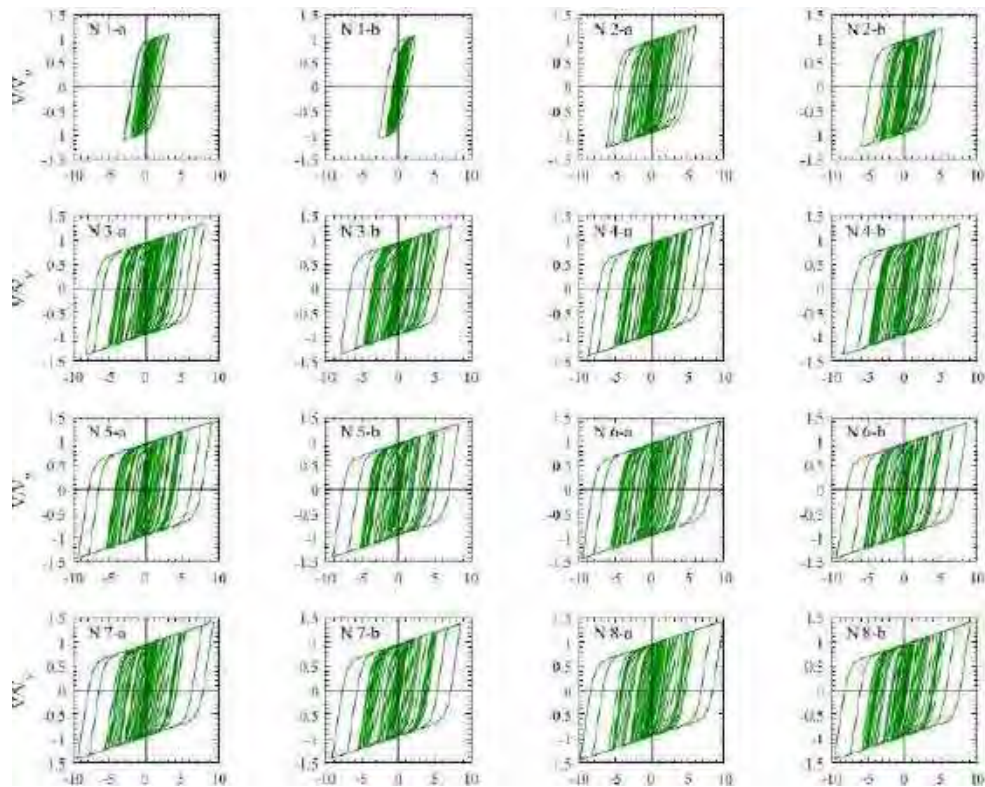


Figura 8.107. Modelo de 24 entresijos con base flexible



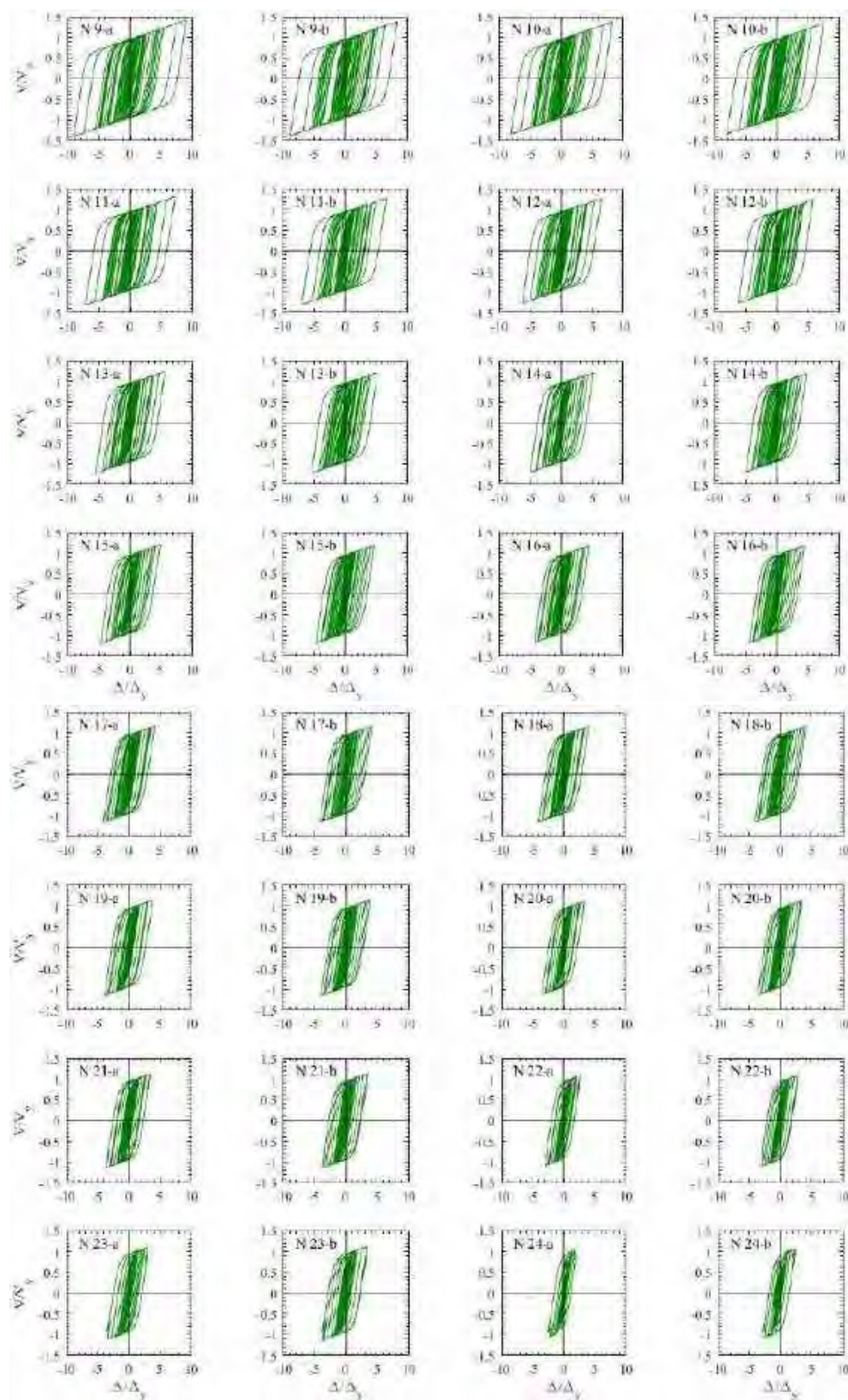
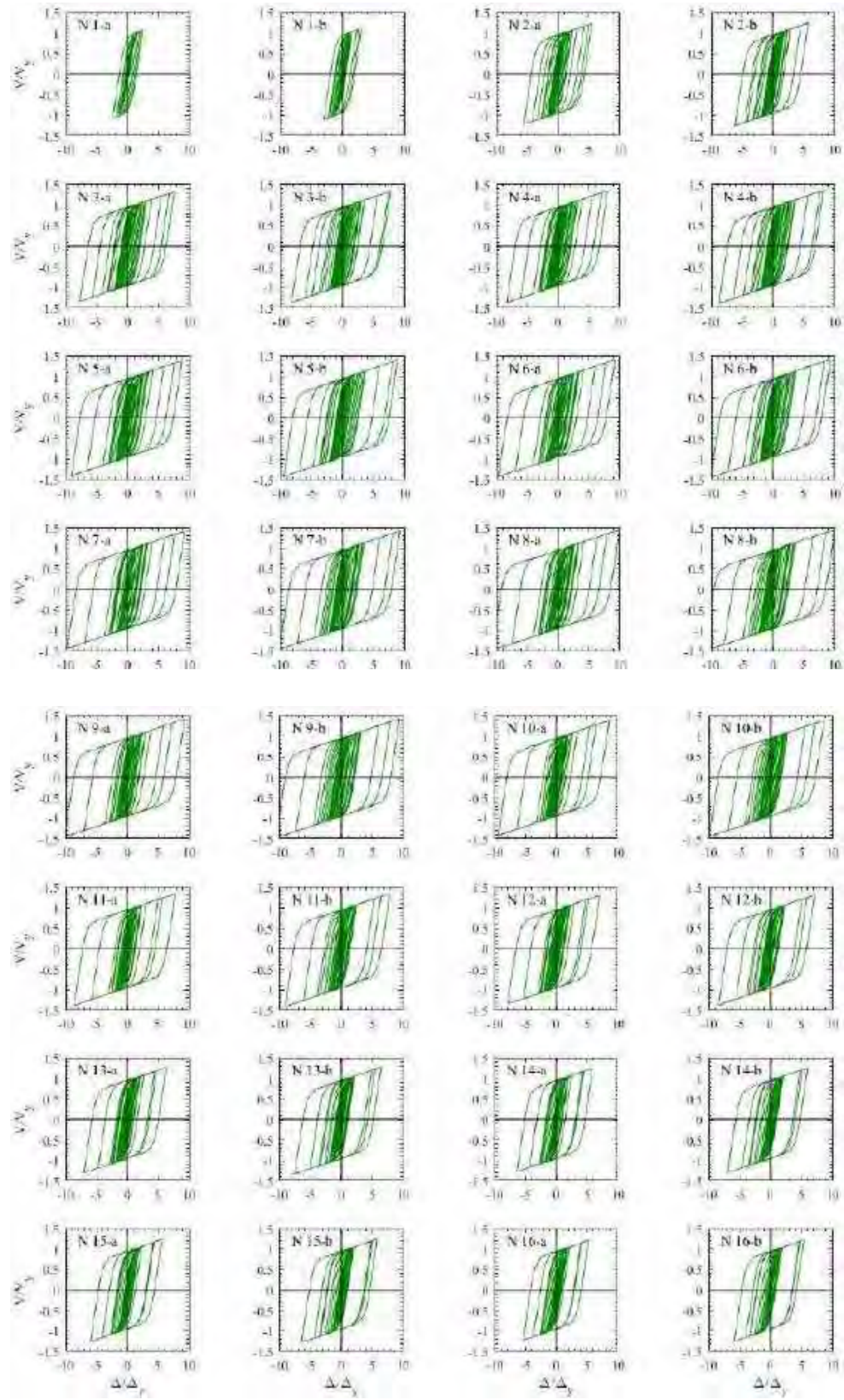


Figura 8.108. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, modelo de 24 entrepisos con base flexible, registros de aceleración CJ03a



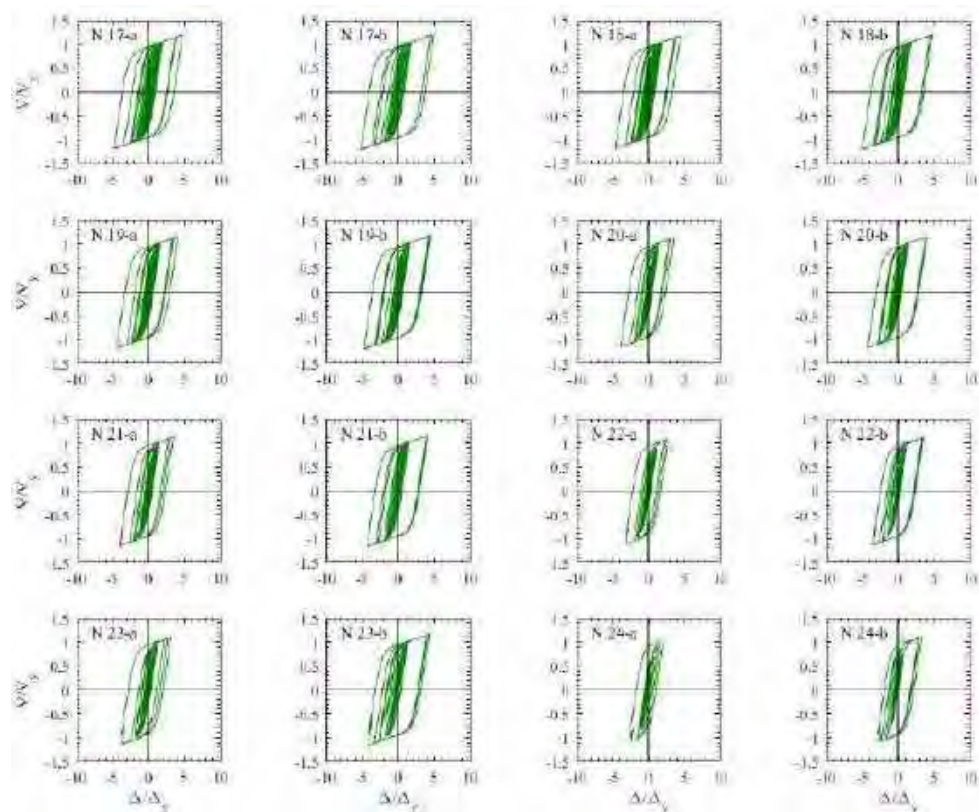
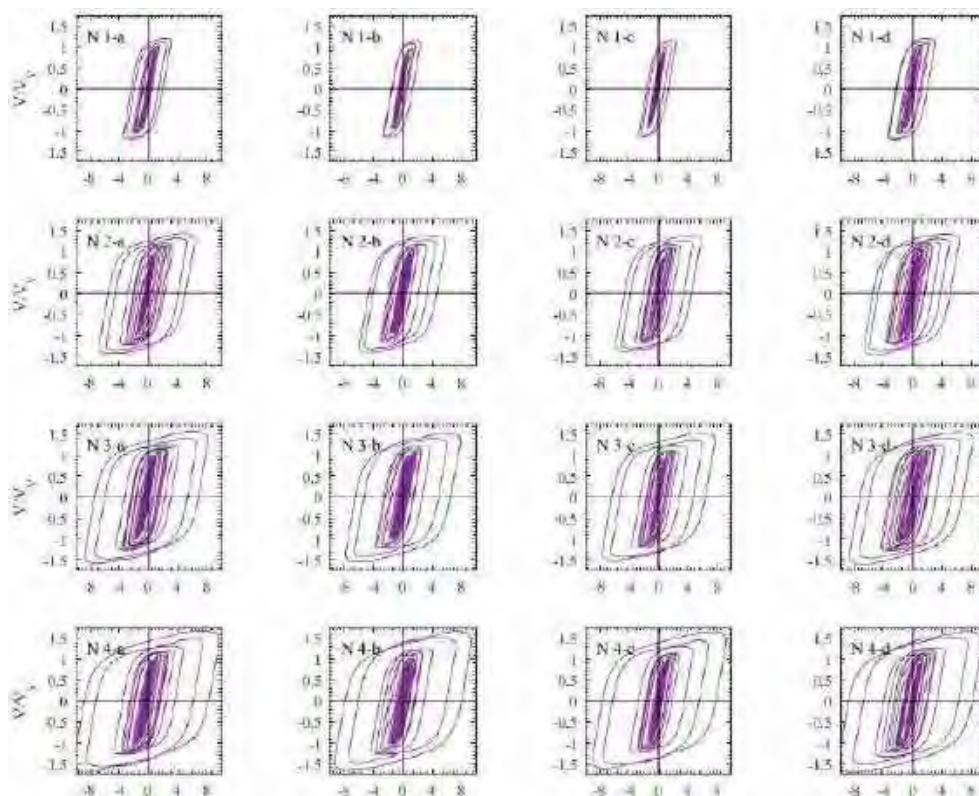
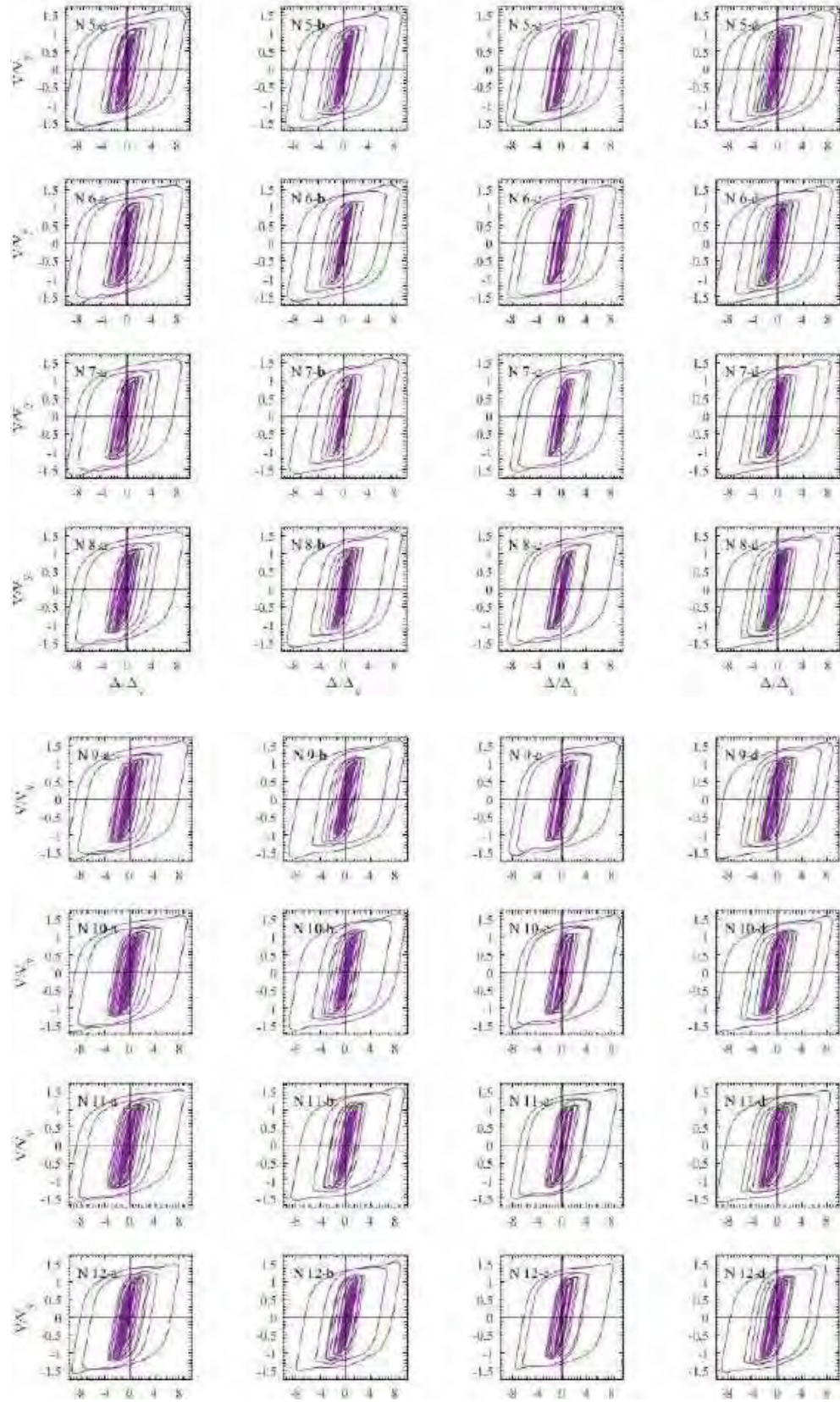
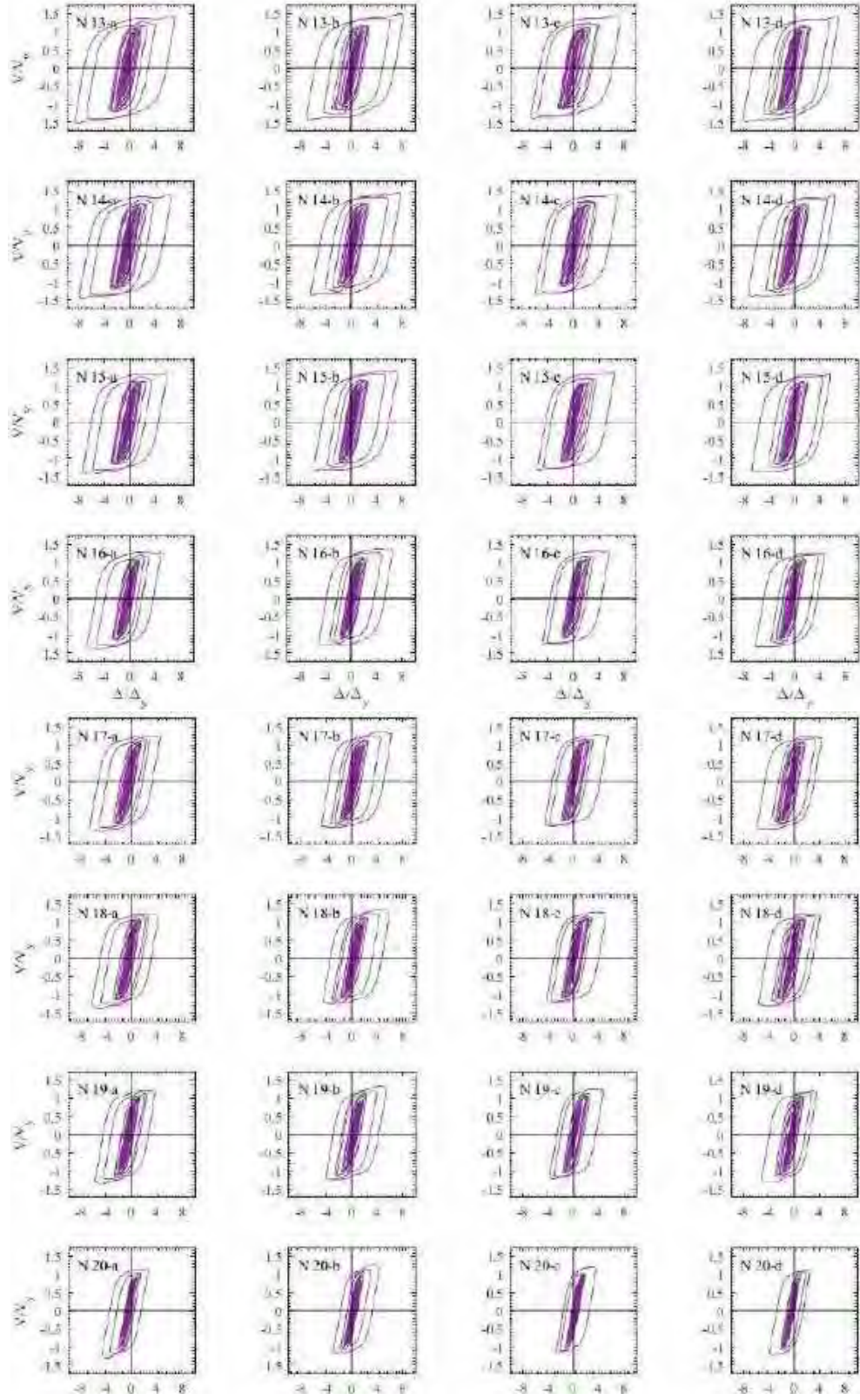


Figura 8.109. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, modelo de 24 entrepisos con base flexible, registros de aceleración CJ03b







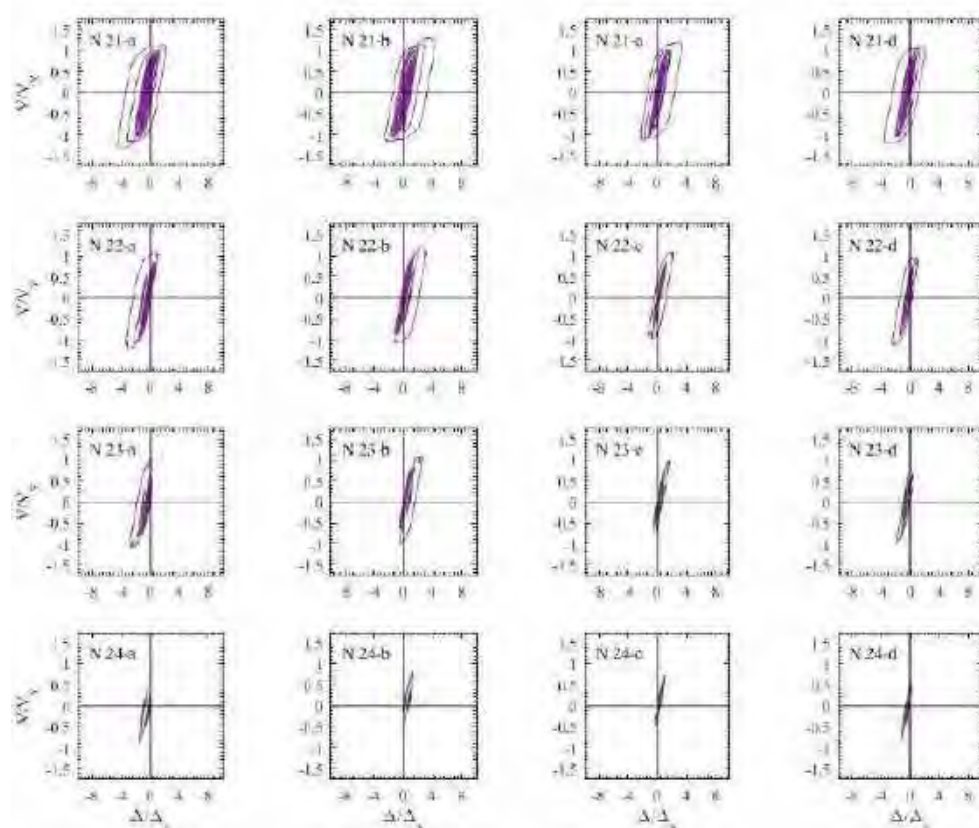
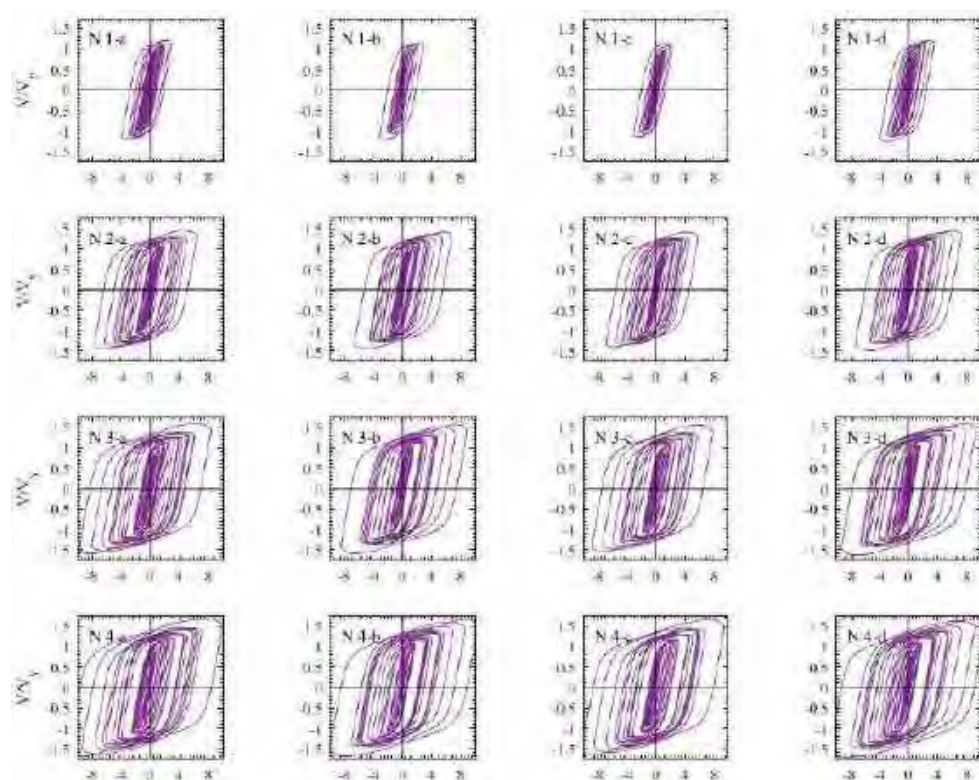
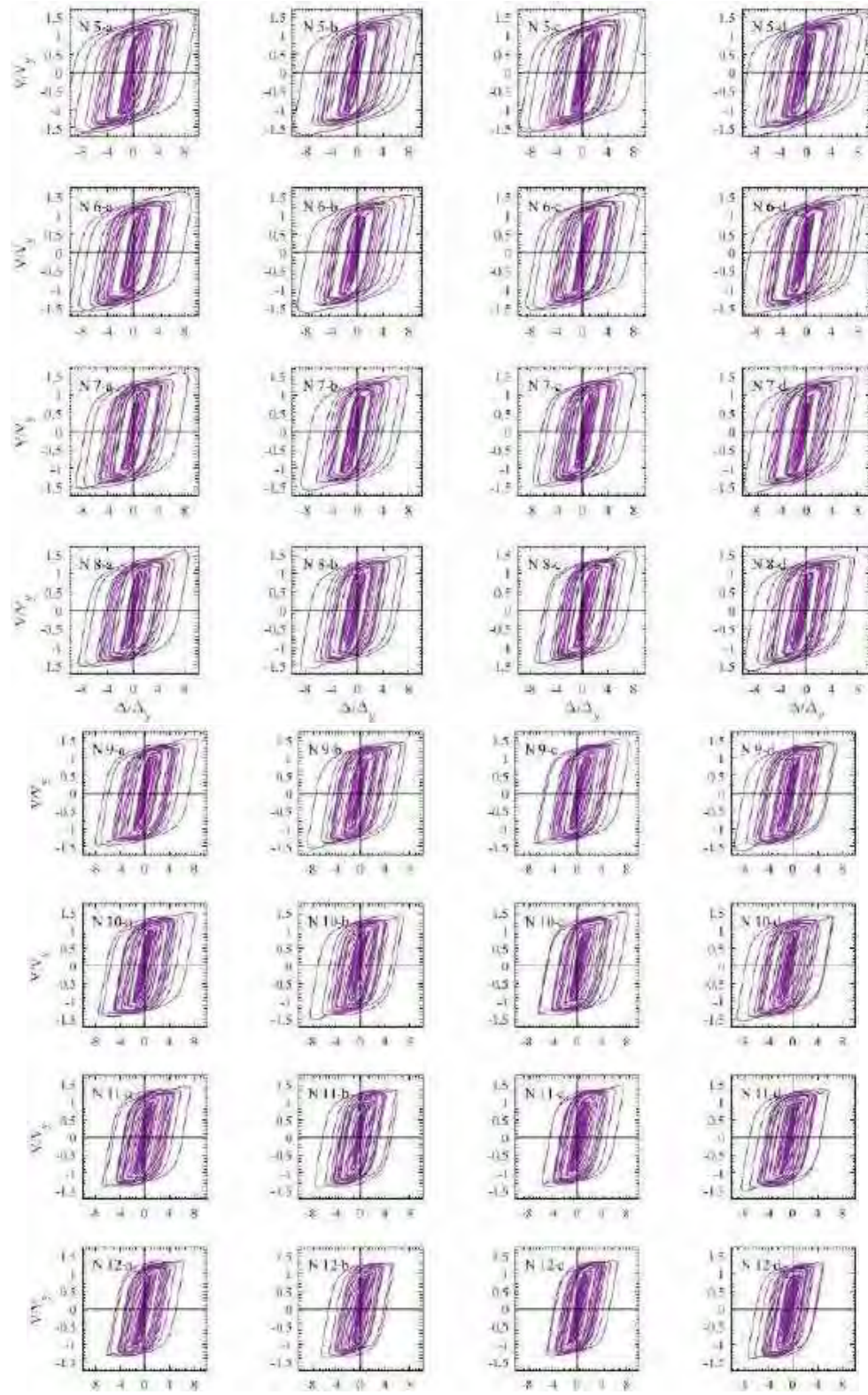
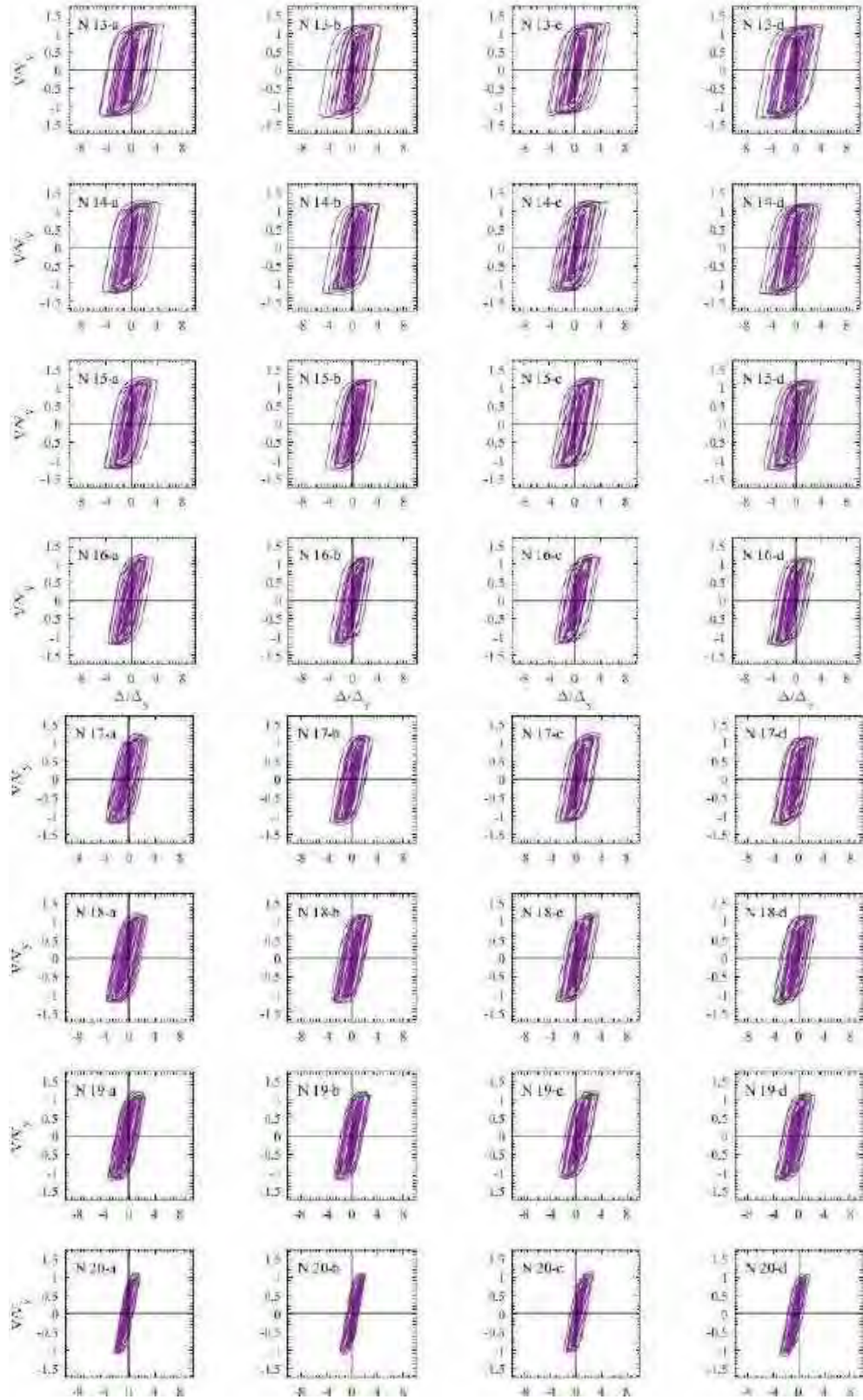


Figura 8.110. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, modelo de 24 entrepisos con base flexible, registros de aceleración CJ03a







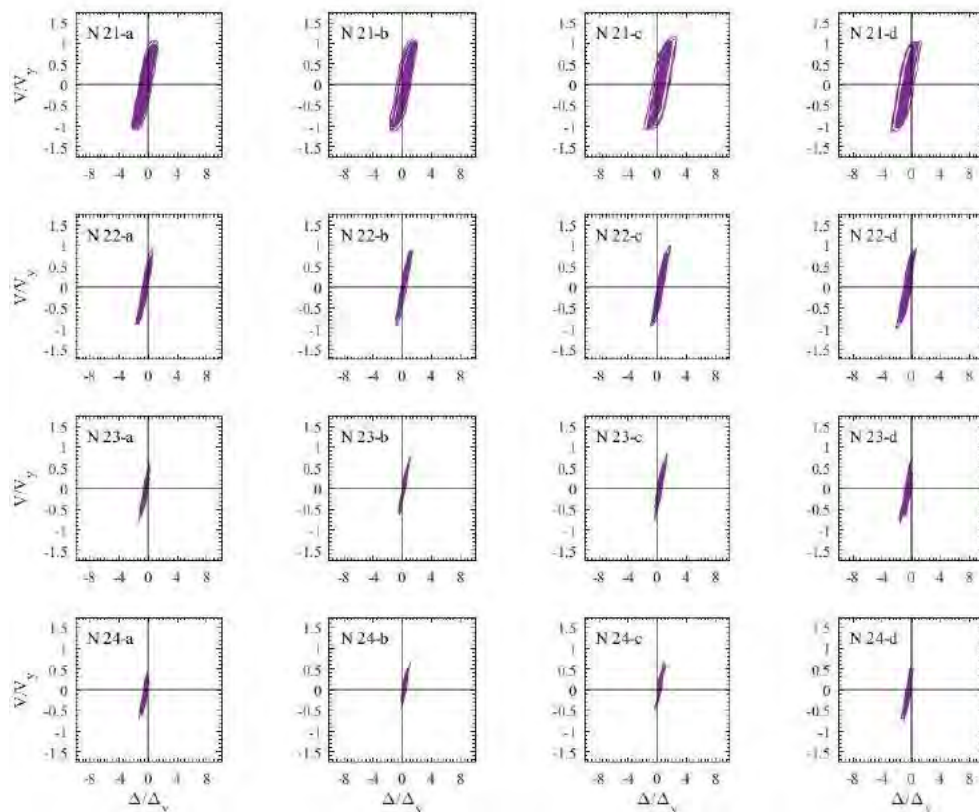
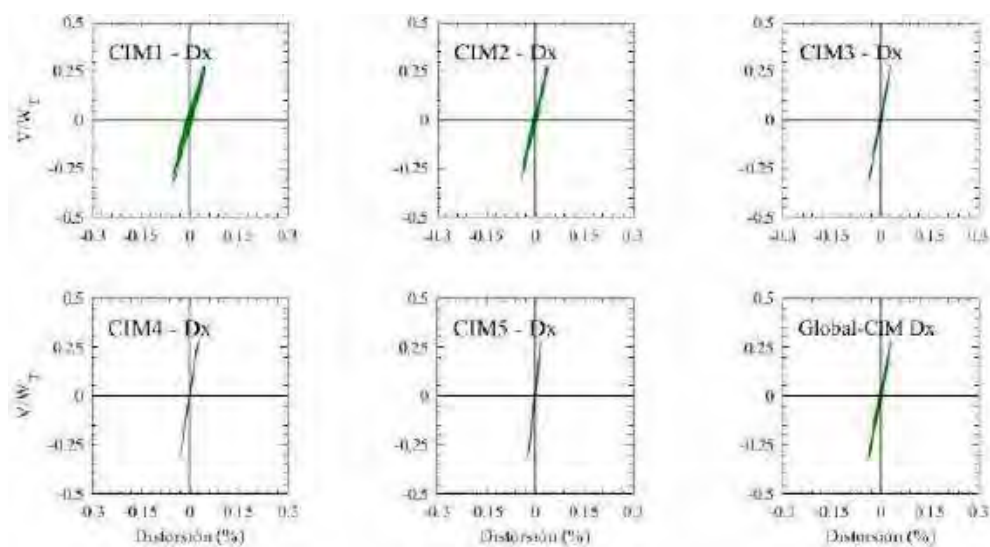
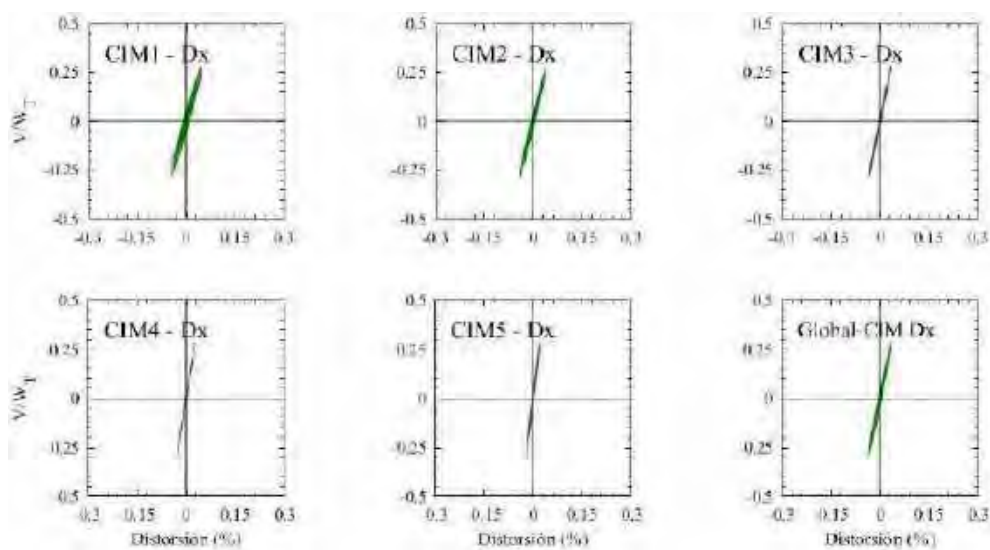


Figura 8.111. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, modelo de 24 entrepisos con base flexible, registros de aceleración CJ03b

En las figuras 8.112 a 8.117 se presentan los ciclos histeréticos por entrepiso que se desarrollan en la dirección x e y para el edificio con 24 entrepisos, y tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura. De manera general se observan que los ciclos histeréticos que desarrollan mayores valores de fuerza cortante son los generados por los registros CJ03 para la dirección y (figuras 8.116 y 8.117). Además, se aprecia que los mayores valores de distorsión y ciclos de histéresis que se desarrollan, se presentan en los entrepisos donde los disipadores de energía alcanzan sus ductilidades máximas. De manera general, se observa el mismo comportamiento que se tiene para todos los modelos evaluados con base flexible en el presente trabajo, donde los ciclos histeréticos en los entrepisos de los sótanos se comportan de manera elástica para todos los casos y, por ende, el comportamiento global para la zona de cimentación será elástica también (figuras 8.112 y 8.113).

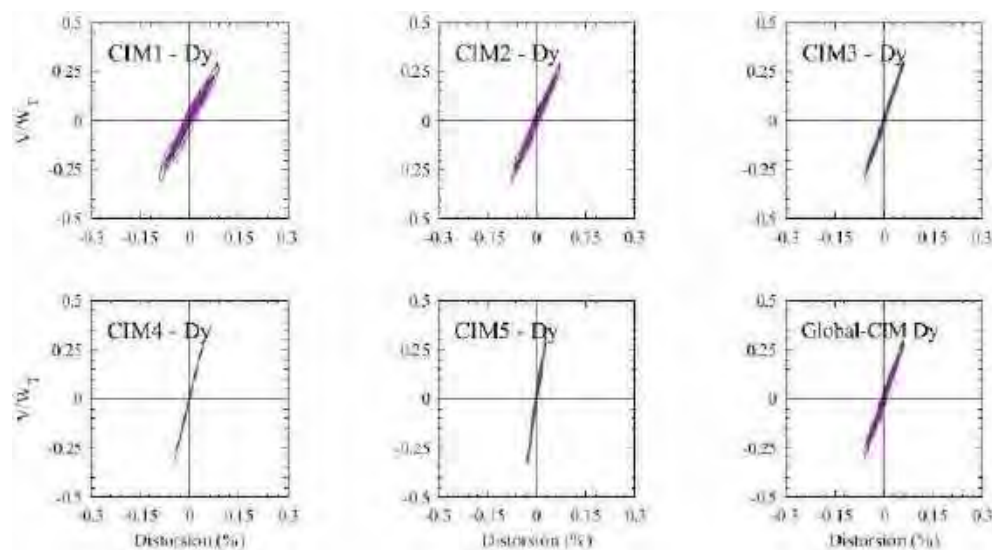


a) Registros de aceleración CJ03a

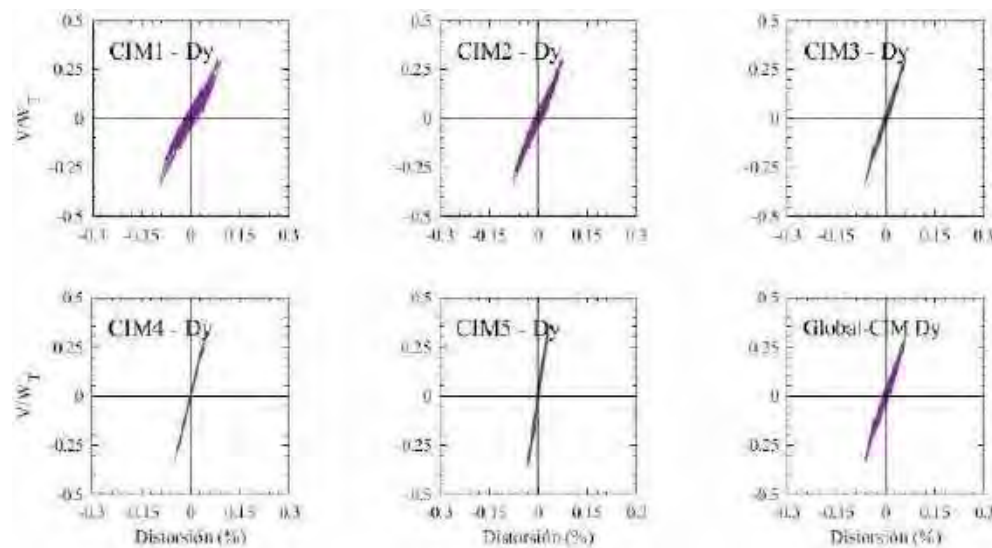


b) Registros de aceleración CJ03b

Figura 8.112. Ciclos de histéresis de los sótanos, modelo de 24 niveles con base flexible, dirección x

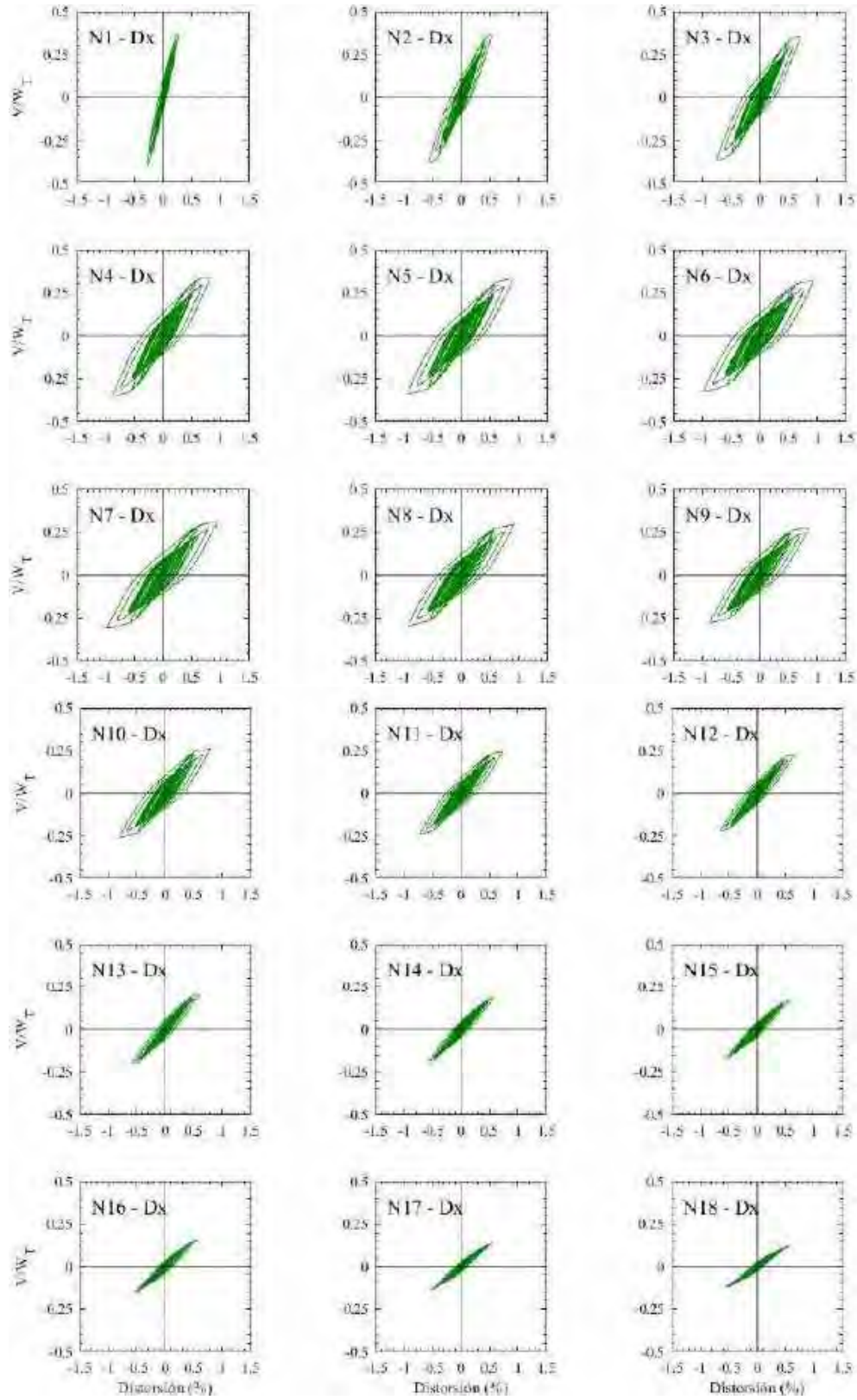


a) Registros de aceleración CJ03a



b) Registros de aceleración CJ03b

Figura 8.113. Ciclos de histéresis de los sótanos, modelo de 24 niveles con base flexible, dirección y



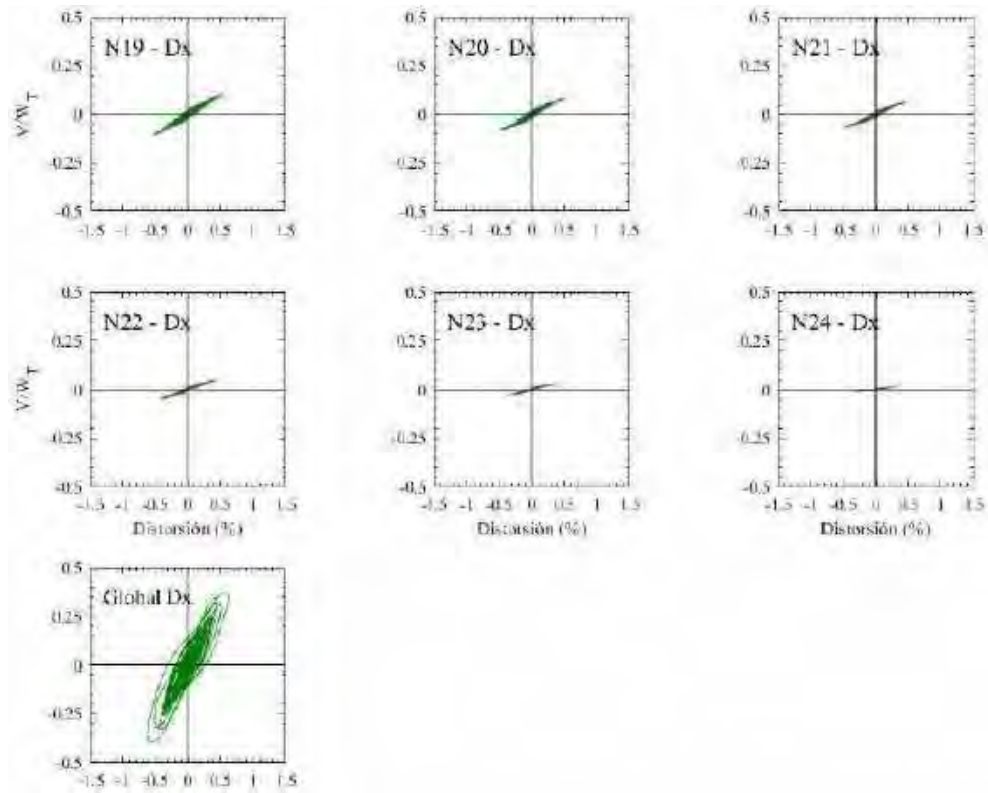
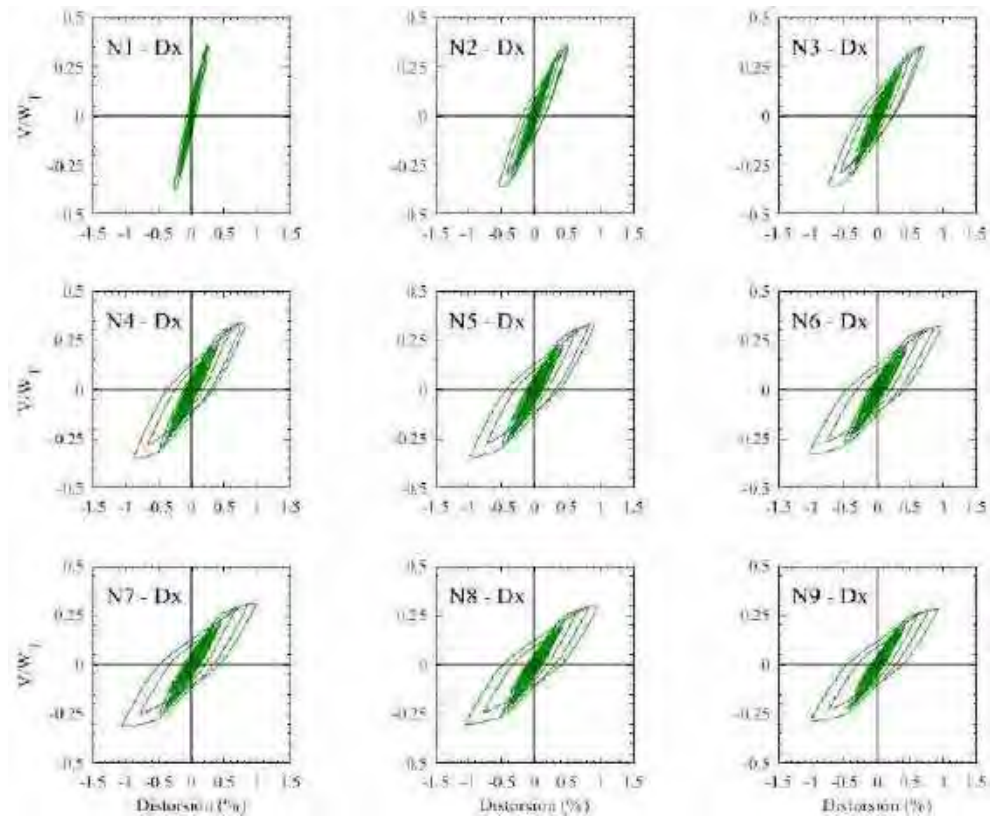


Figura 8.114. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03a



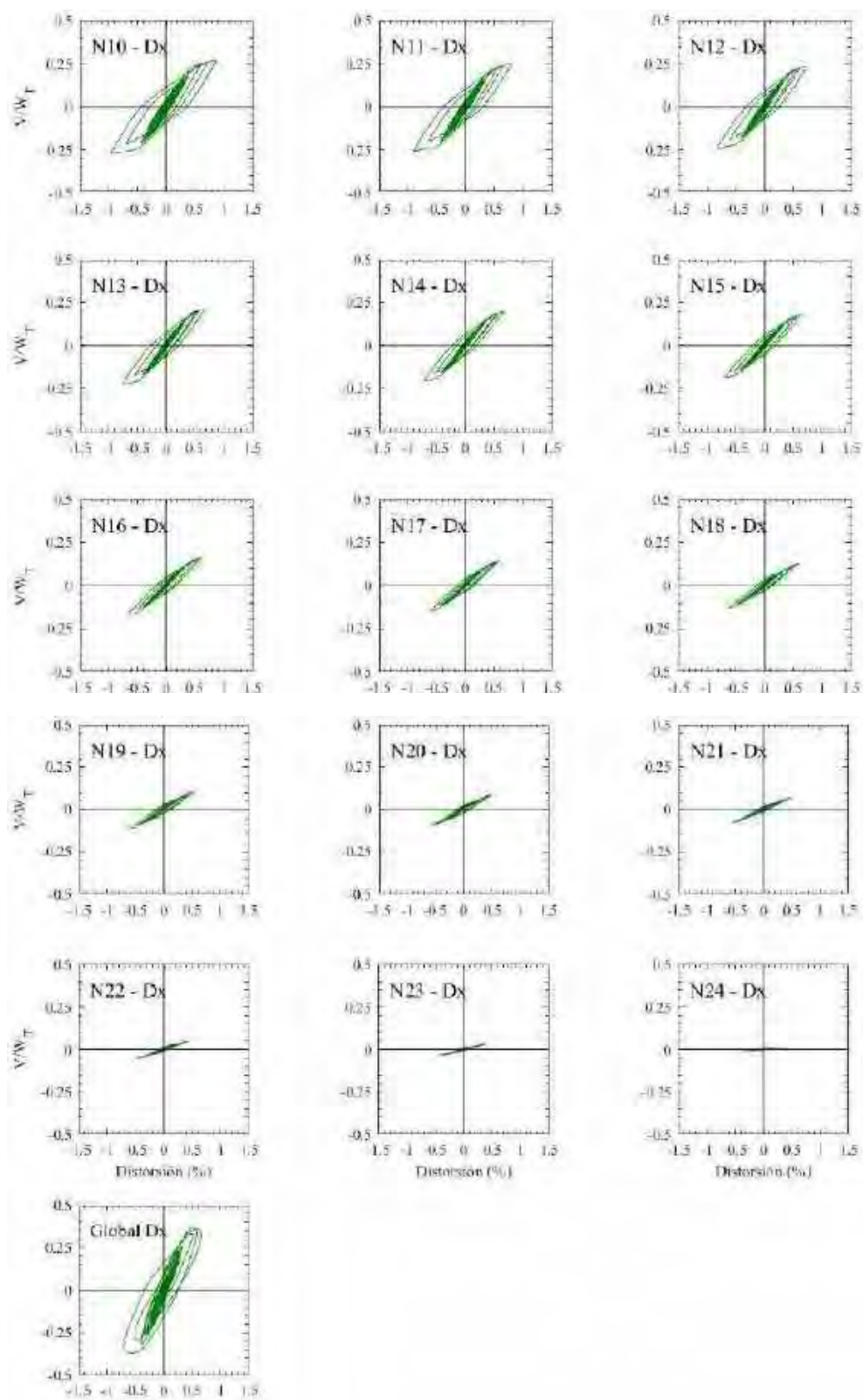
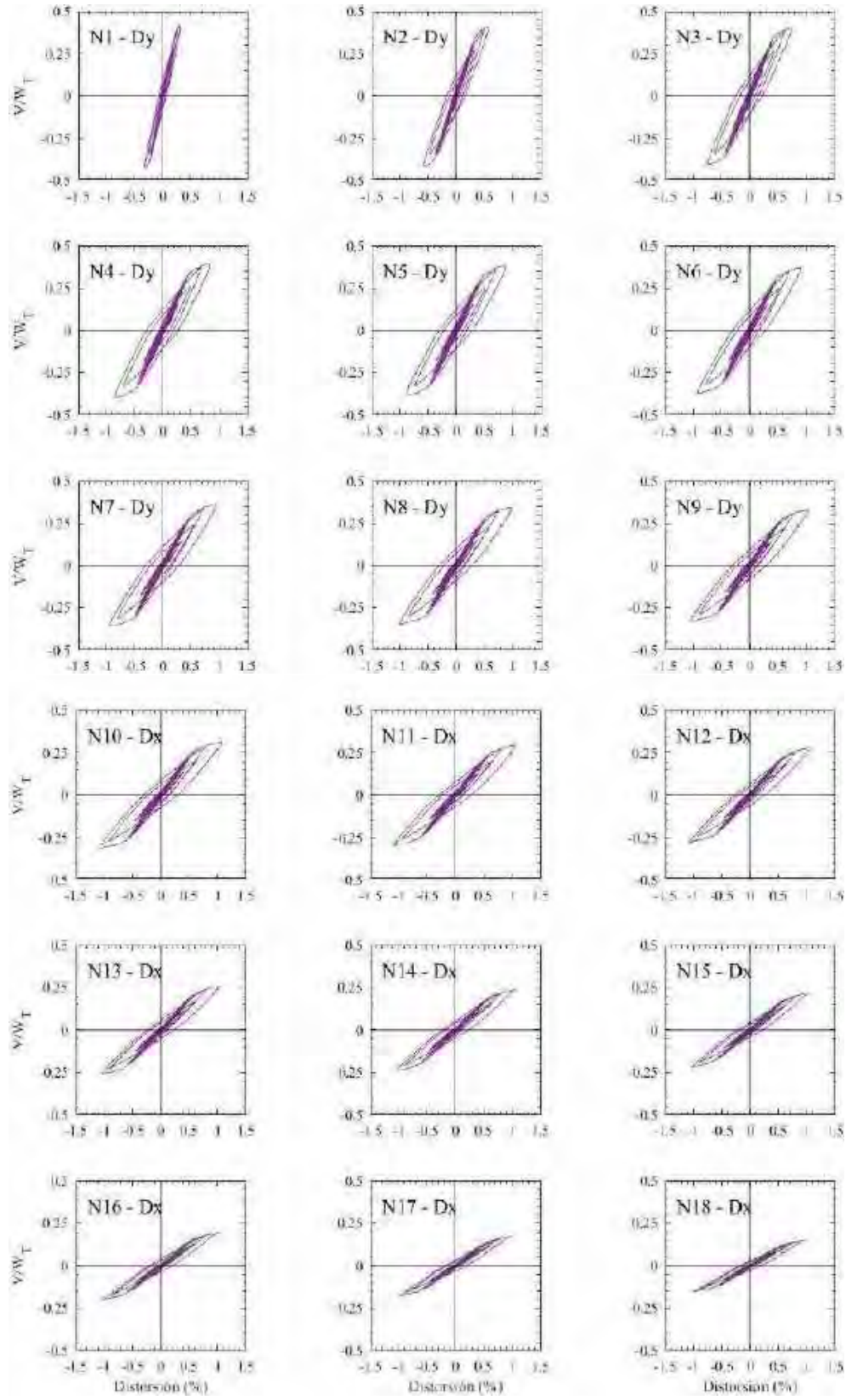


Figura 8.115. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03b



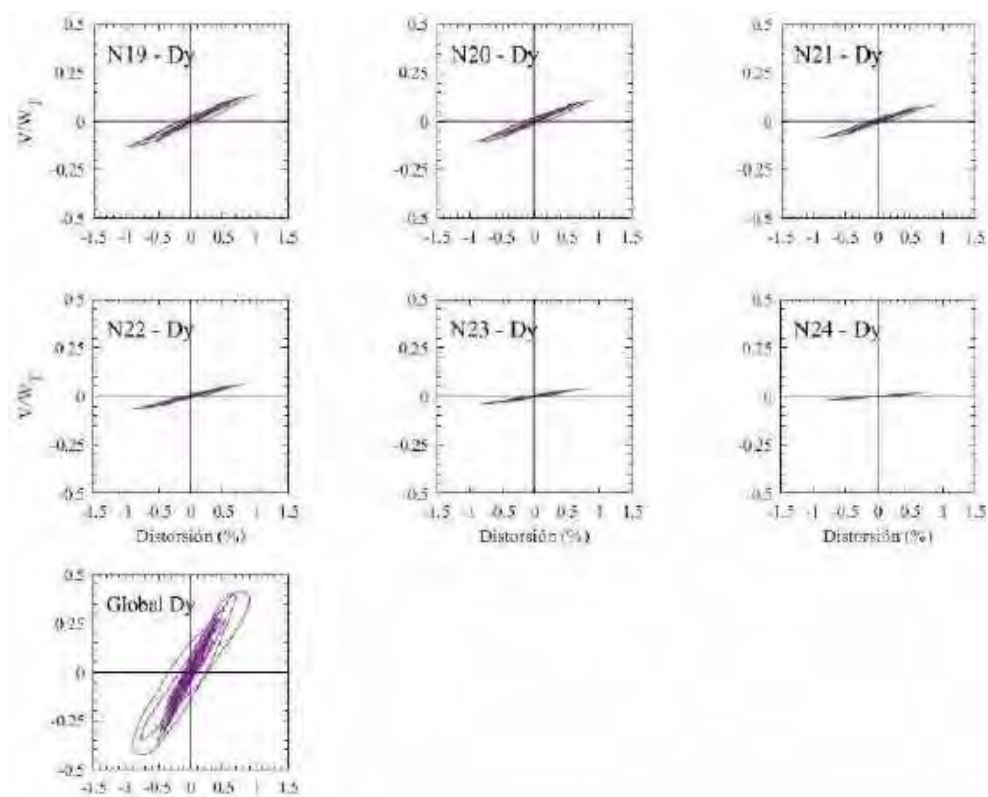
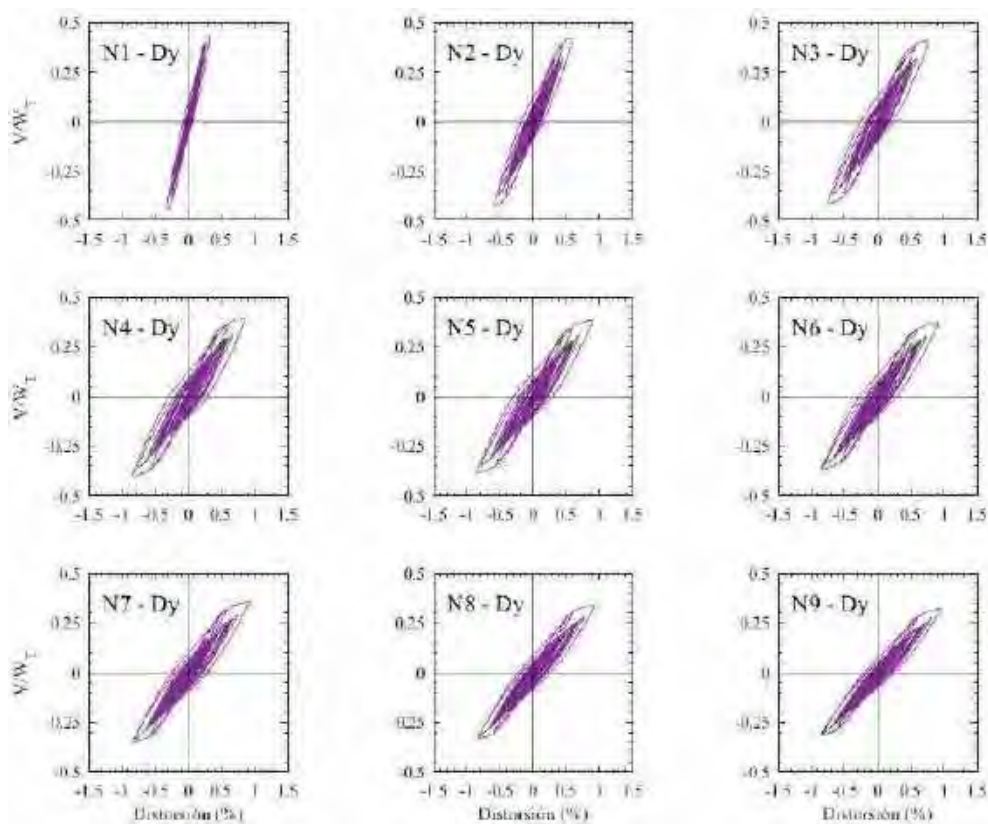


Figura 8.116. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03a



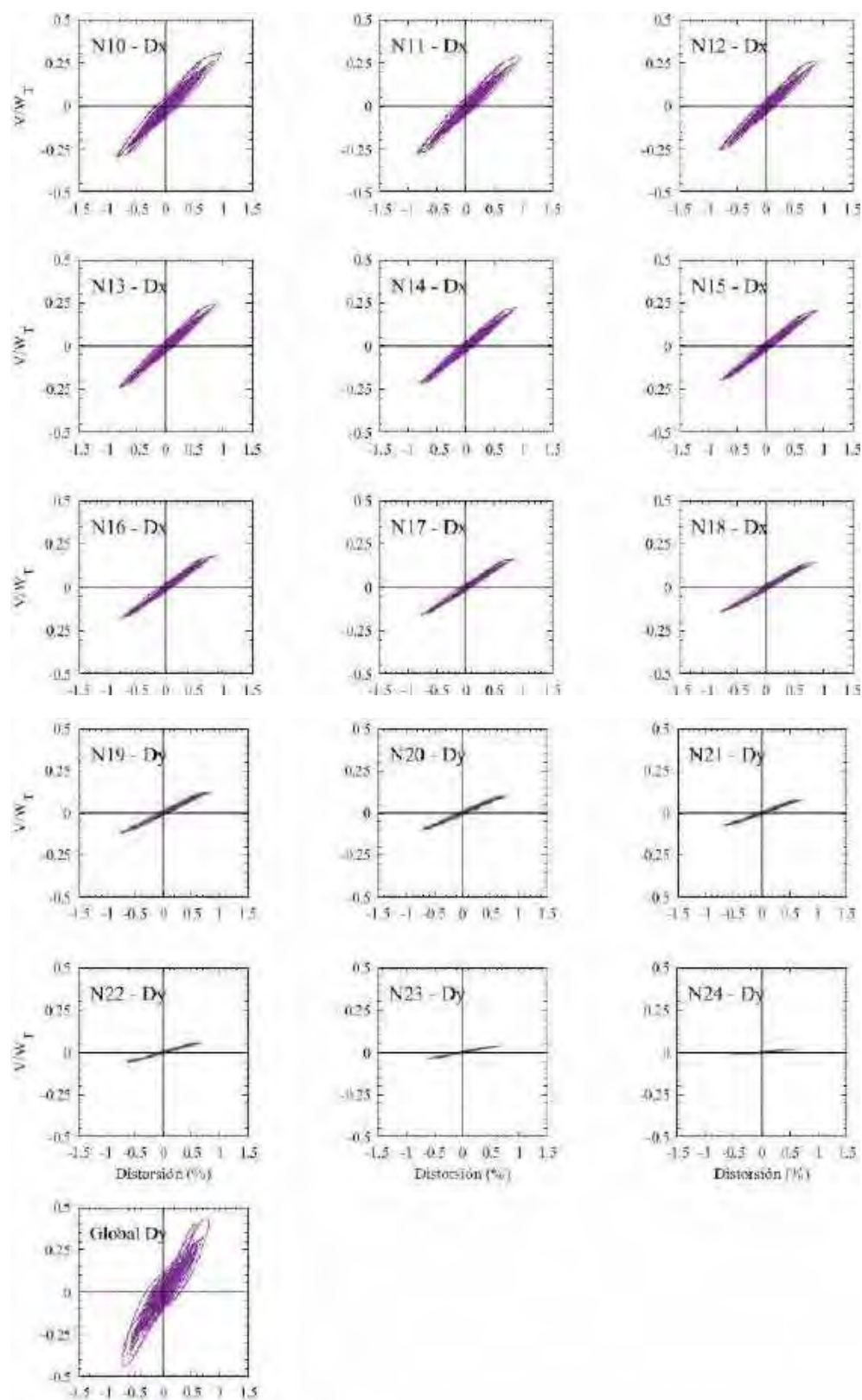
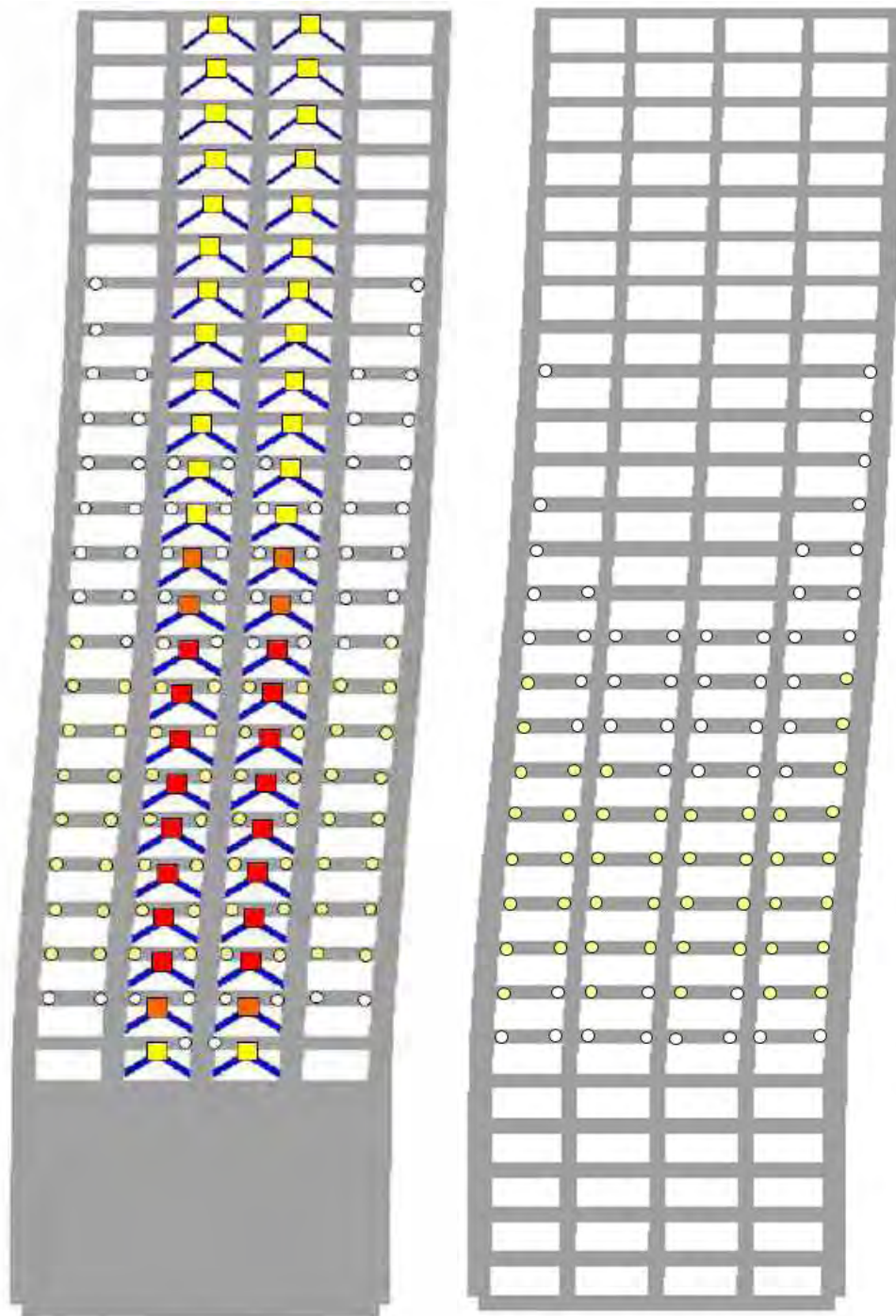


Figura 8.117. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03b

Se presentan en las figuras 8.118 a 8.121 los mapeos de fluencias inelásticas del modelo de 24 entrepisos modelando por debajo de éste sus niveles de sótano, y tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura. Se aprecia de manera general que para los casos más desfavorables, todas las columnas y contravientos de soporte permanecen elásticos durante toda la excitación sísmica. El desempeño estructural en la dirección x exhibe fluencias incipientes en las vigas, tanto de los marcos exteriores como de los marcos interiores. El nivel de rotación que presentan estos elementos depende en gran medida de la ductilidad local que llegan a desarrollar los disipadores tipo ADAS. De esta manera, cuando los disipadores desarrollan una ductilidad de $\mu_d < 10$, las fluencias máximas de las vigas representan menos del 10% de la rotación última de esos elementos (figura 8.118). Por otra parte, cuando los disipadores ADAS llegan a sobrepasar la ductilidad para la cual fue diseñada ($\mu_d \geq 10$), el nivel de fluencia de las vigas aumenta hasta un 15% de la rotación última en los entrepisos de los marcos que contienen a los disipadores que podrían fallar (figura 8.119a).

Para el desempeño estructural en la dirección y , se presentan el mayor nivel de fluencia de todos los casos evaluados en el presente trabajo. Se aprecia que cuando al modelo 24 niveles con base flexible, se somete a la excitación sísmica donde mayor número de BRBs desarrollan su ductilidad última, algunas de las vigas desarrollan fluencias menores al 20% de la rotación última del elemento, y éstas se presentan en más de la mitad de los entrepisos para la crujía intermedia de los marcos perimetrales (figura 8.120a). Aunque los elementos de disipación de energía son los que mayor contribución al comportamiento no lineal aportan a la estructura completa, las vigas pudieran tener trabajos de reparación muy menores después de un evento sísmico de gran magnitud, como alguna inyección de fisuras o grietas minúsculas como resinas, pues la magnitud de la deformación residual así lo amerita (figura 8.124). Por otra parte, en el caso cuando los elementos ADAS exhiben su máximo comportamiento, la dirección ortogonal a ésta presenta también un excelente desempeño estructural, debido a que varios dispositivos BRB alcanzan su ductilidad máxima y el nivel de fluencia de las vigas es menor al 15% de la rotación última, las cuales se presentan de manera exclusiva en los marcos perimetrales (figura 8.121a).

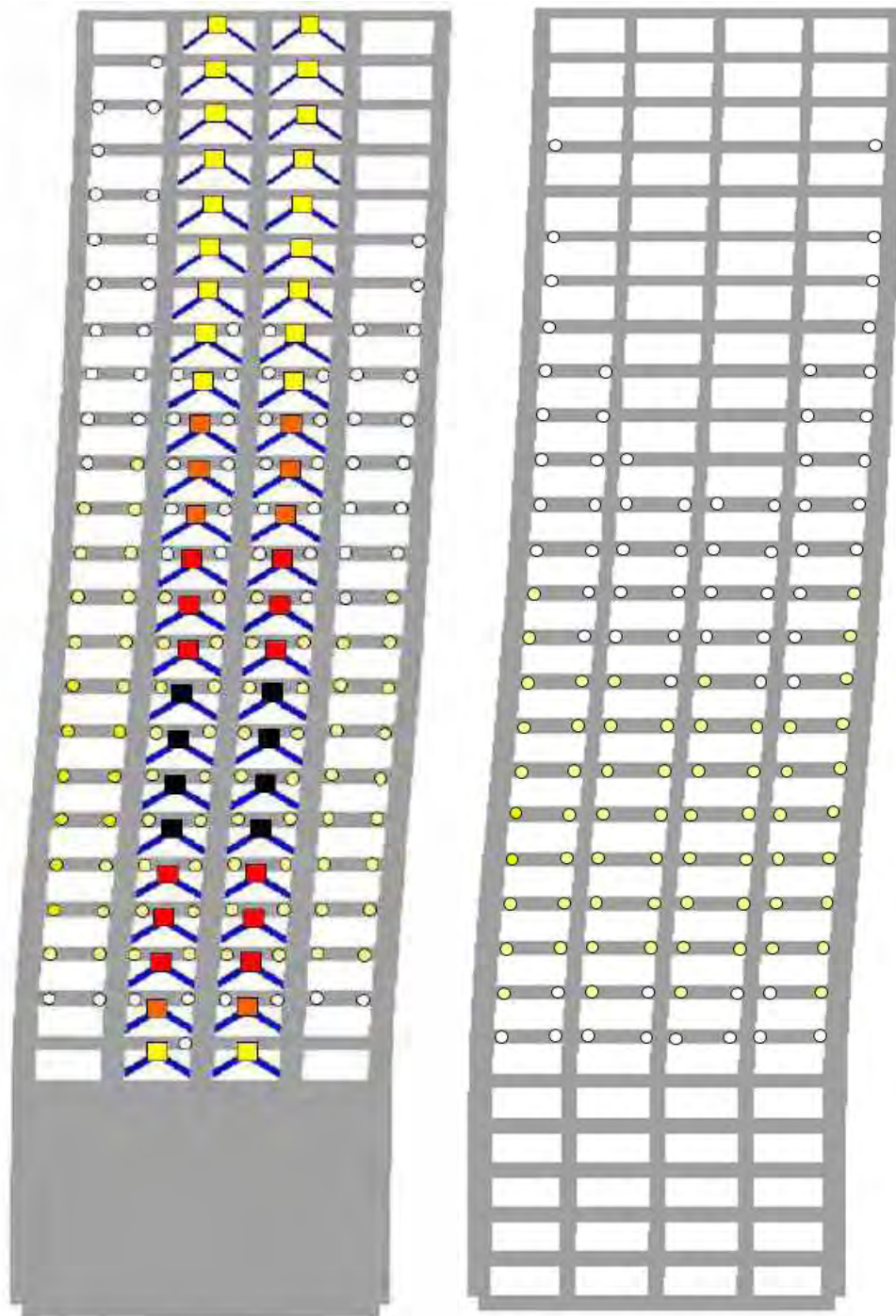
En las figuras 8.122 a 8.125 se presentan los mapeos de fluencias inelásticas residuales de los modelos de 24 entrepisos con base flexible. Se aprecia de éstas que conforme la estructura es más flexible, se presentan menos cambios significativos entre las magnitudes de las rotaciones máximas y las residuales para ambas direcciones. También se observa que las magnitudes de las rotaciones residuales en la dirección y se reducen en los marcos exteriores e interiores a un código de color que representa daño incipiente y fácilmente reparable (figuras 8.124 y 8.125). Asimismo, se observa que la ductilidad de los disipadores disminuye en el último paso de tiempo a vibración libre de las señales inducidas, con excepción de los dispositivos que desarrollan una ductilidad mayor a la de diseño.



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

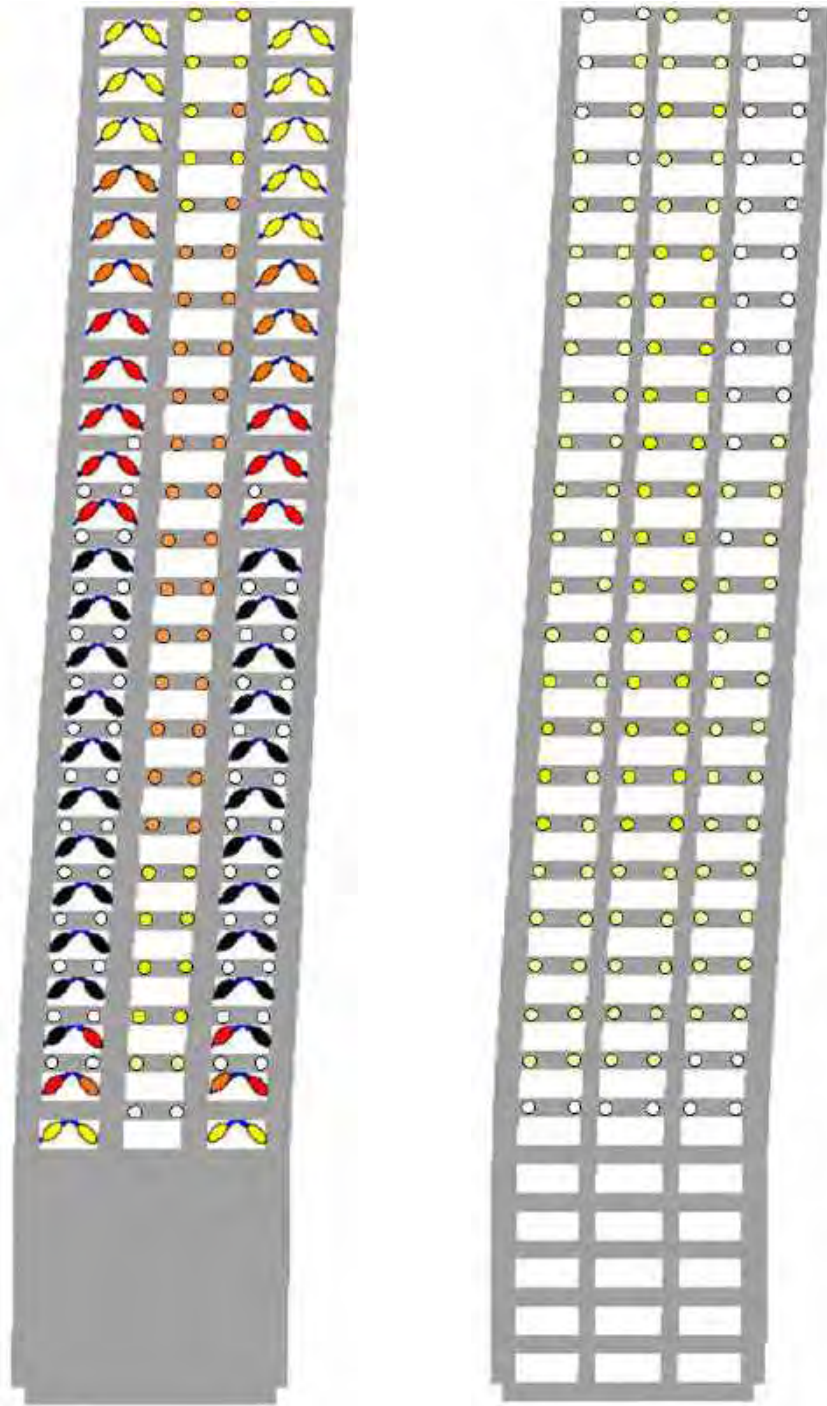
Figura 8.118. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección x , para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03a



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

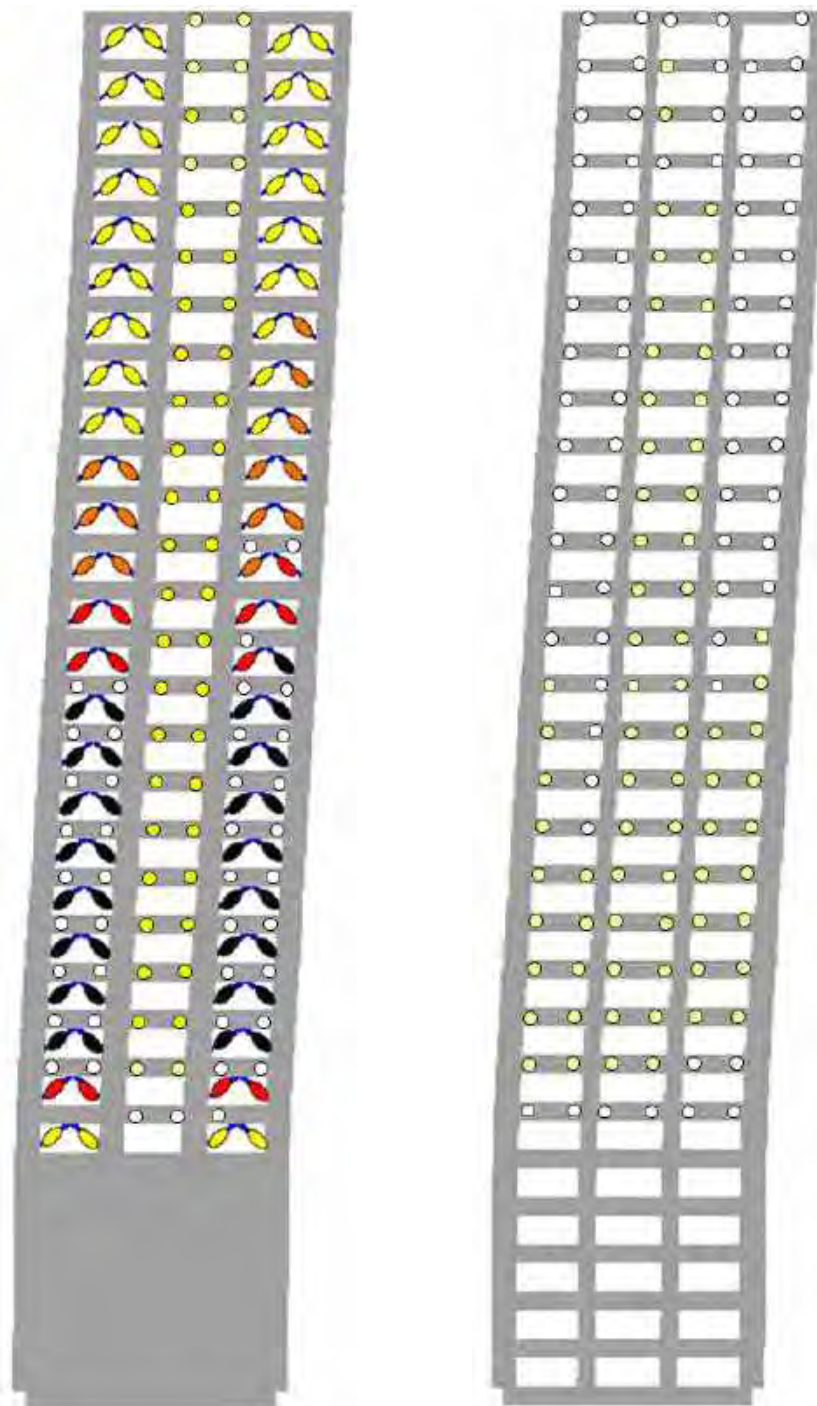
Figura 8.119. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección x , para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03b



a) Marco perimetral (BRB)

b) Marco interior

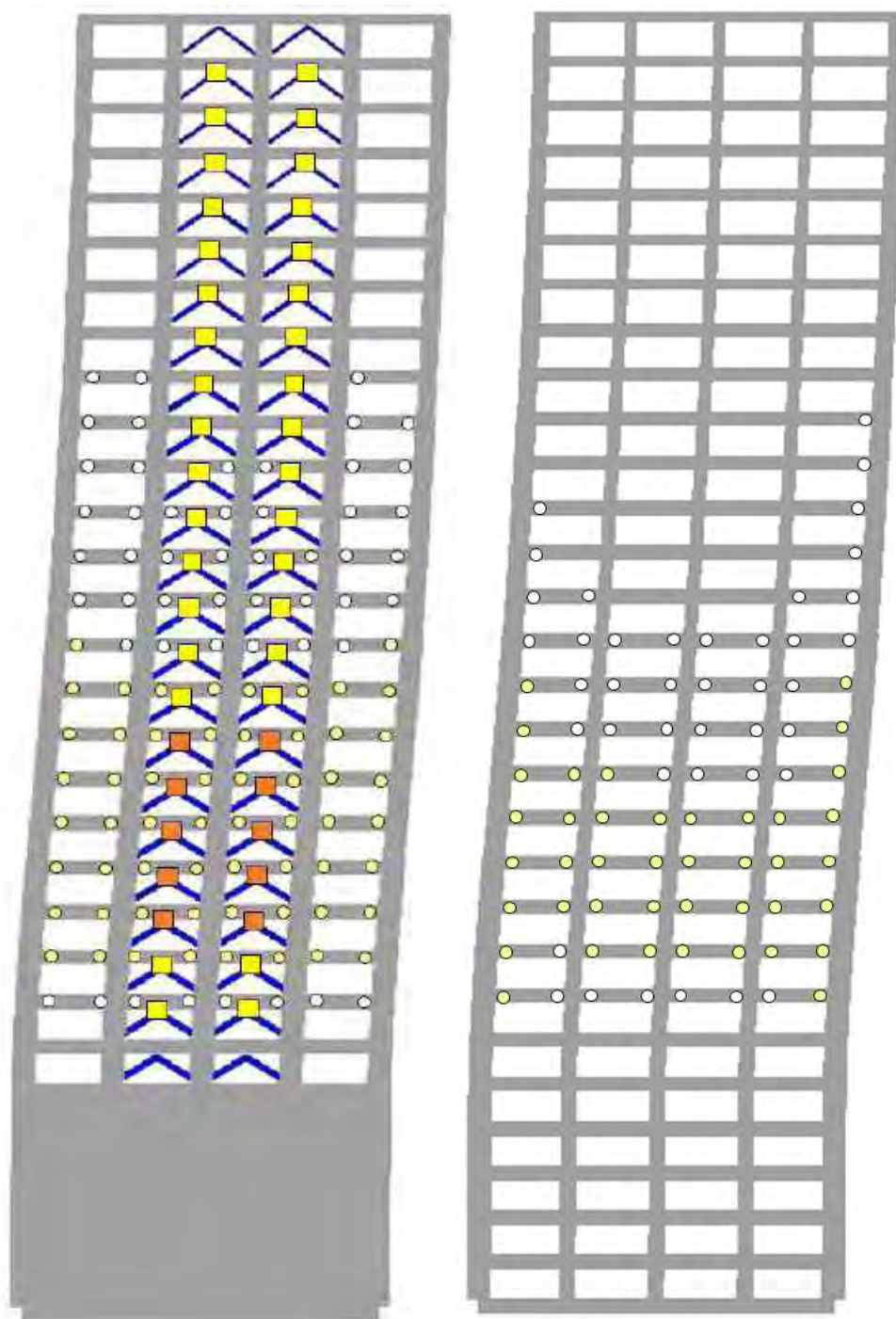
Figura 8.120. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección y, para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03a



a) Marco perimetral (BRB)

b) Marco interior

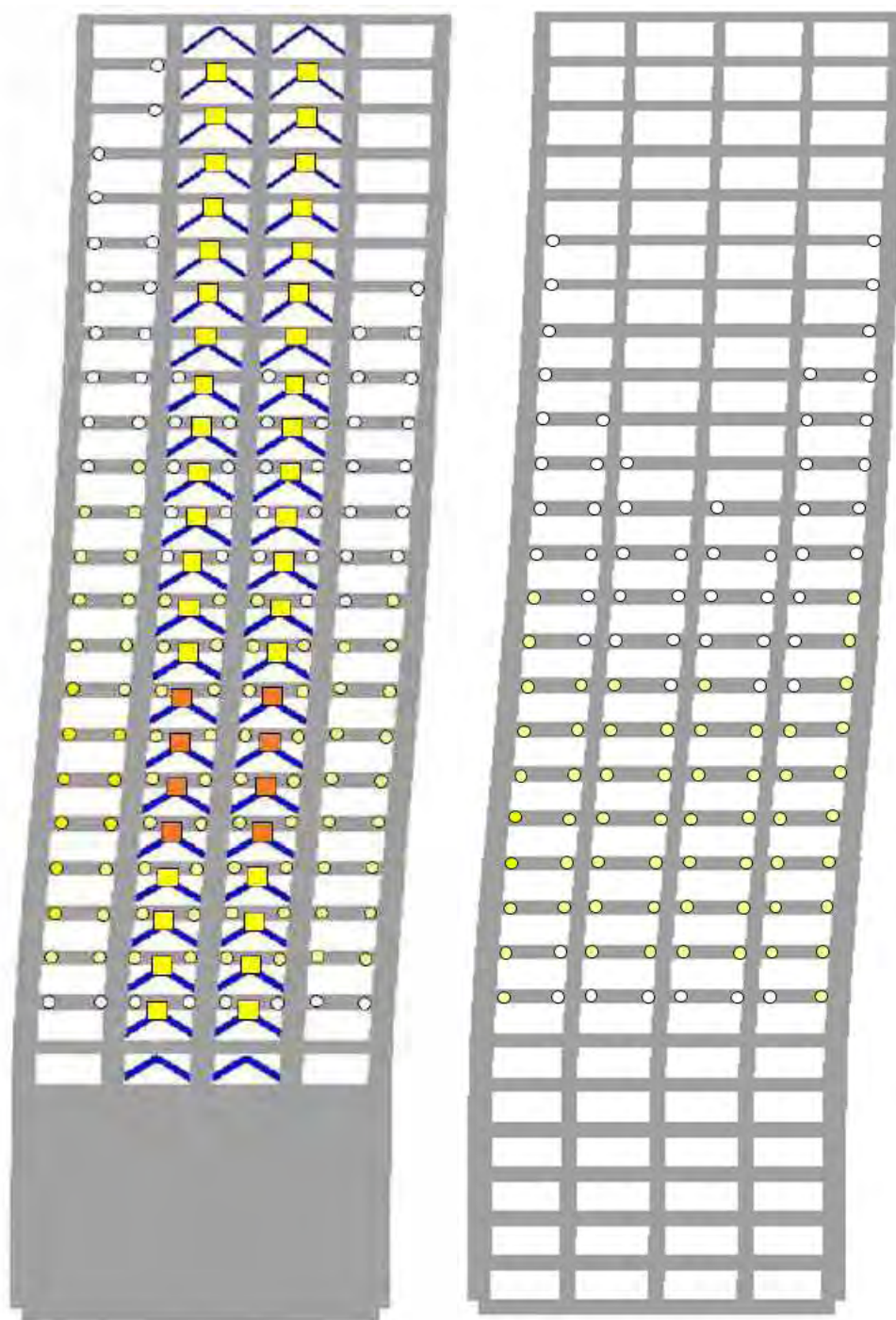
Figura 8.121. Mapeo de fluencias inelásticas máximas en dirección y, para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03b



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

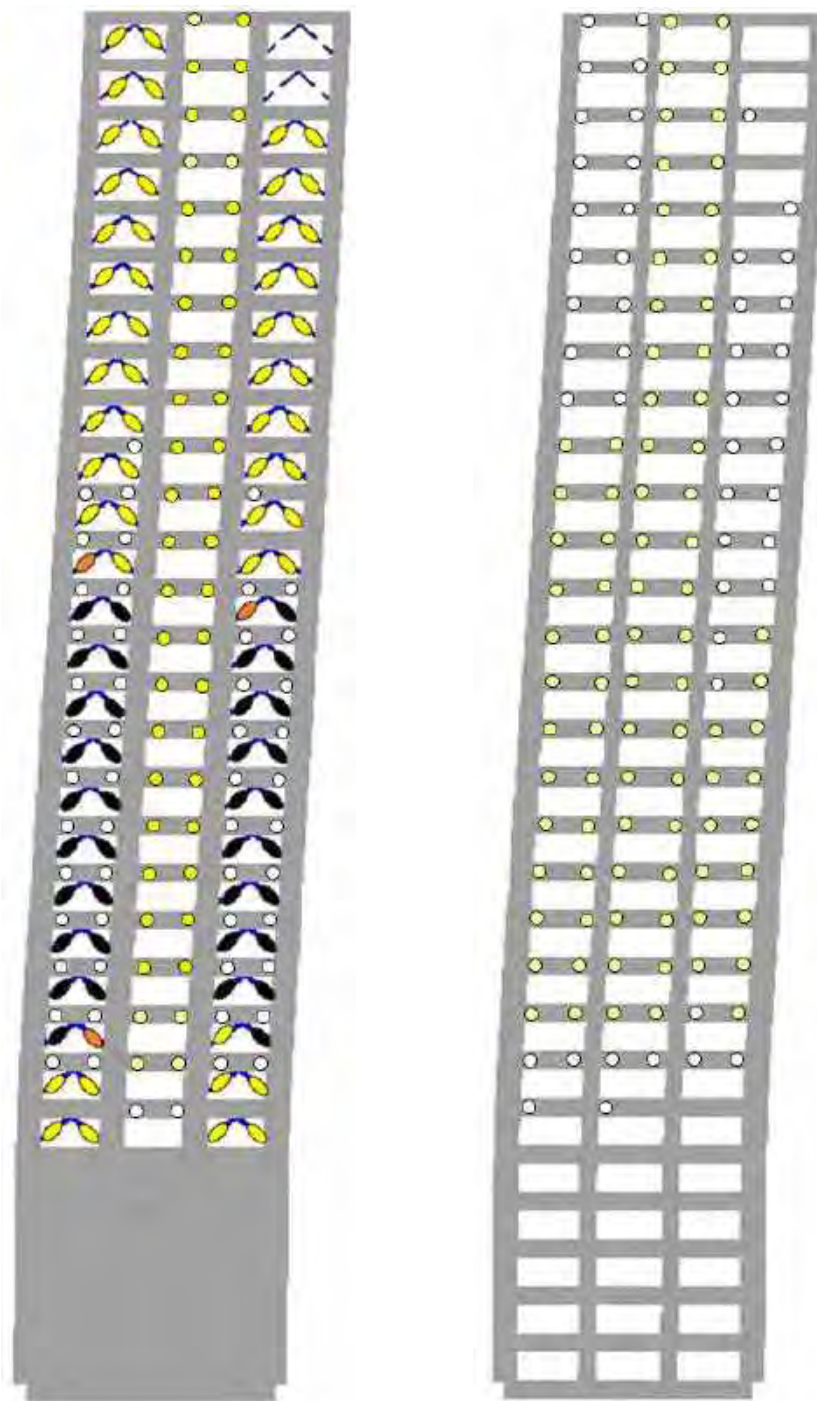
Figura 8.122. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección x , para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03a



a) Marco perimetral (ADAS)

b) Marco interior

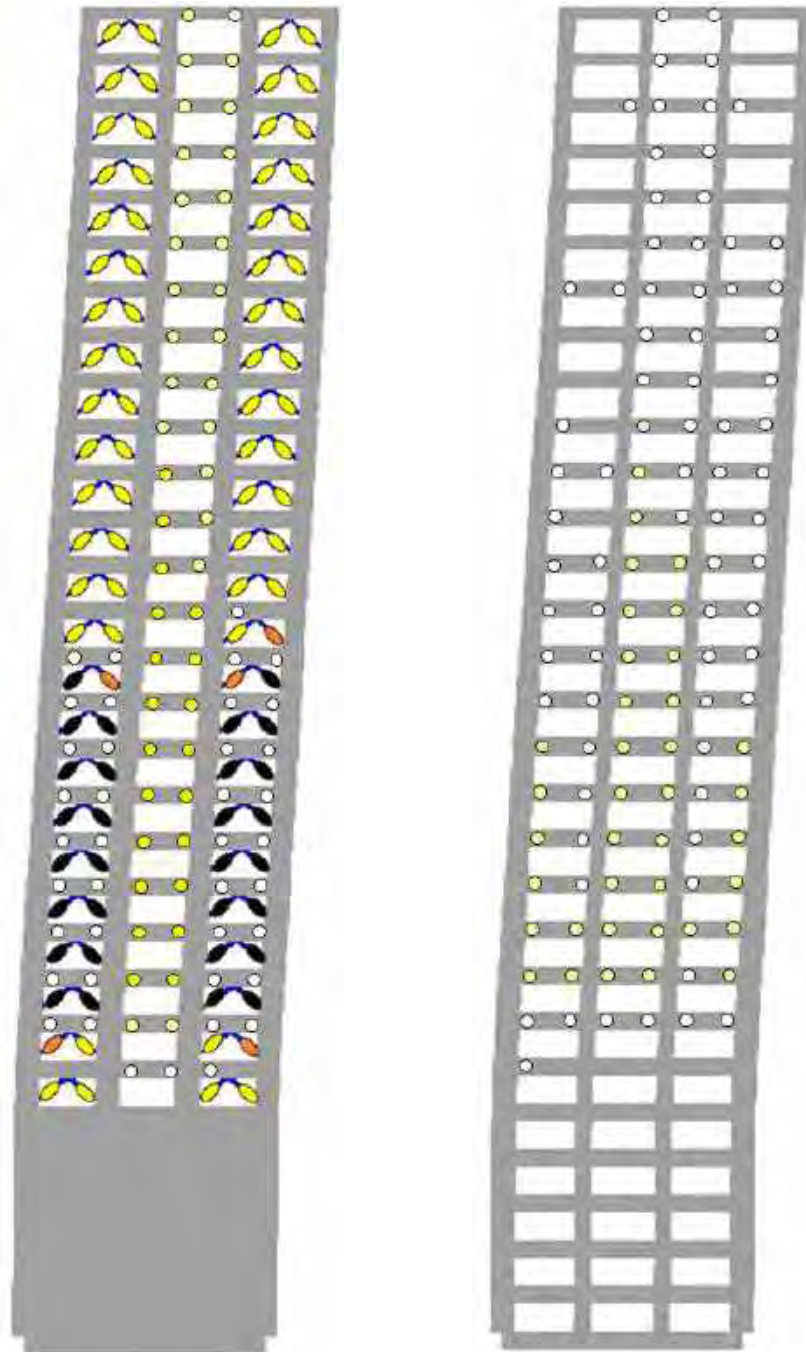
Figura 8.123. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección x , para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03b



a) Marco perimetral (BRB)

b) Marco interior

Figura 8.124. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección y, para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03a



a) Marco perimetral (BRB)

b) Marco interior

Figura 8.125. Mapeo de fluencias inelásticas residuales en dirección y, para el modelo de 24 niveles con base flexible, registros de aceleración CJ03b

En la figura 8.126 se presentan los ciclos histeréticos que desarrollan las vigas con los mayores valores de rotación, cuando los disipadores de energía alcanzan sus ductilidades máximas en ambas direcciones de análisis. De esta manera, se aprecia que para la dirección x , las vigas de los entresijos cinco al ocho, presentan los mayores valores de rotación aunque éstas son menores del 15% de la rotación última ($V2x$). Las vigas en dirección y son las que presentan los mayores valores de rotación para todos los casos evaluados, y se observa en la figura 8.122b que el comportamiento no lineal más desfavorable se presenta para las vigas de los niveles nueve al 13 identificados con el nombre $V3y$, y éstos se presentan exclusivamente en las crujías intermedias de los marcos exteriores para el caso A de los registros de aceleración CJ03 (figura 8.120a). Se comprueba de la observación de la figura 8.122 que las vigas más demandadas requerirían de una reparación muy menor, pues la rigidez efectiva secante máxima es 70.3% de la rigidez elástica para la viga más demandada, pero la rotación residual máxima es 0.000121 rad, la cual es tan pequeña que está asociada a fisuras pequeñas que se pueden reparar con inyección de resinas epóxicas.

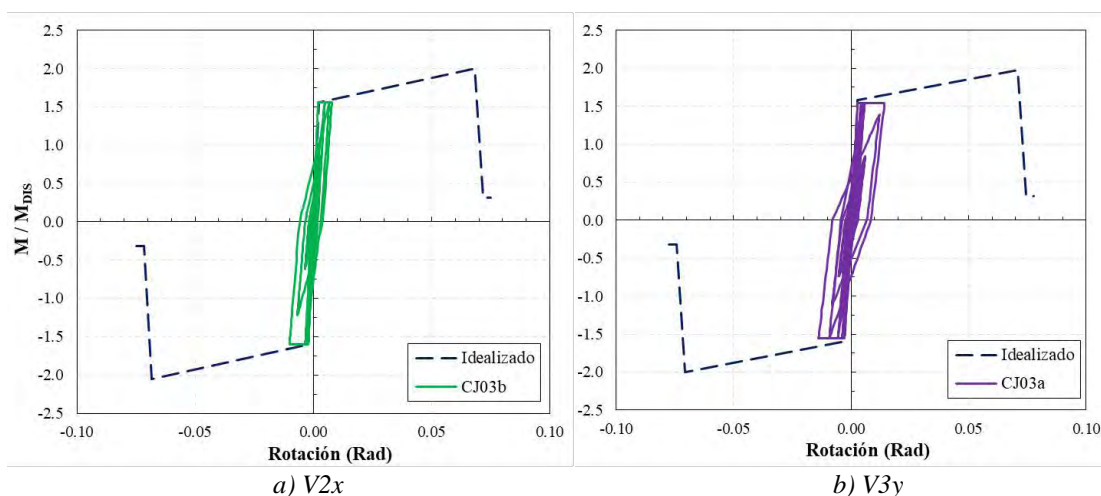


Figura 8.126. Máximas rotaciones en vigas para el edificio de 24 entresijos con base flexible

8.6.3 Respuestas globales

En las gráficas que se presentan a continuación, se muestran y comparan los resultados representativos de la respuesta global de los edificios de 24 entrepisos con base rígida y base flexible. Para cada figura en particular, se grafica la respuesta promedio generado por todos los registros de aceleración representativos de la zona IIIb (tabla 8.3), y la respuesta máxima que se presenta por efecto de los registros de aceleración CJ03, los cuales provocaron las ductilidades máximas a los dispositivos ADAS y BRBs. De esta manera, en las figuras 8.127 y 8.128 se reportan las distorsiones de fluencia (Δ_y) y máxima (Δ_{max}), asociadas a condiciones de servicio y al control de daño a vigas y columnas, tanto para base rígida como para base flexible. Con círculos verdes se representa la distorsión promedio desarrollada para la dirección x , y con rombos morados la distorsión promedio para la dirección y . Además, se coloca en cada una de ellas las distorsiones obtenidas del proceso de diseño (capítulo seis), para cada dirección evaluada.

Se observa de las gráficas de la figura 8.127 que las distorsiones generadas por la respuesta promedio no sobrepasan los límites permisibles, e incluso para ciertos entrepisos las distorsiones máximas generadas con los registros CJ03 son menores que aquéllas obtenidas con los análisis modales espectrales. No obstante, en algunos de los entrepisos superiores en la dirección y se obtienen valores mayores al permisible para Δ_y . Por otra parte, se observa que ni los valores promedio ni los valores máximos obtenidos de los análisis dinámicos no lineales paso a paso, sobrepasan el límite máximo permisible para la distorsión Δ_{max} en ningún entrepiso. Asimismo, se aprecia que cuando los disipadores ADAS desarrollan su máxima fluencia, con el caso B de los registros de aceleración CJ03, también desarrollan los máximos valores de distorsión para el modelo de 24 niveles con base rígida.

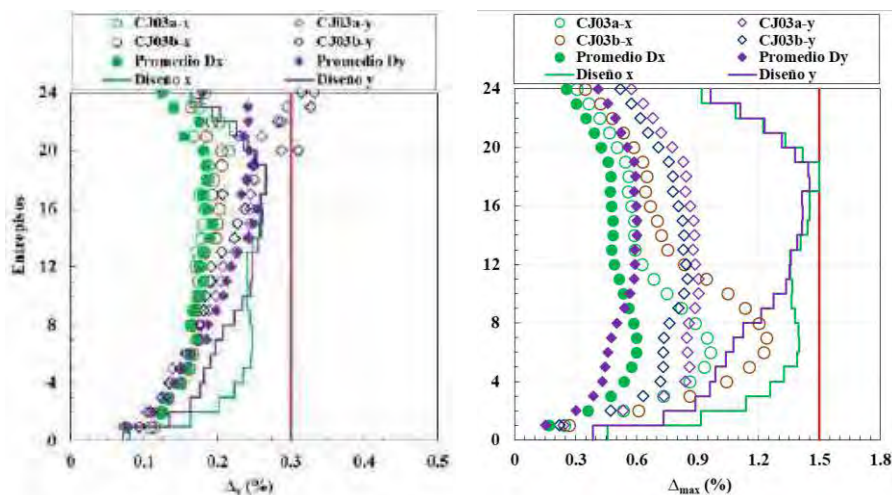


Figura 8.127. Distorsiones de fluencia y máximas, modelo de 24 niveles con base rígida

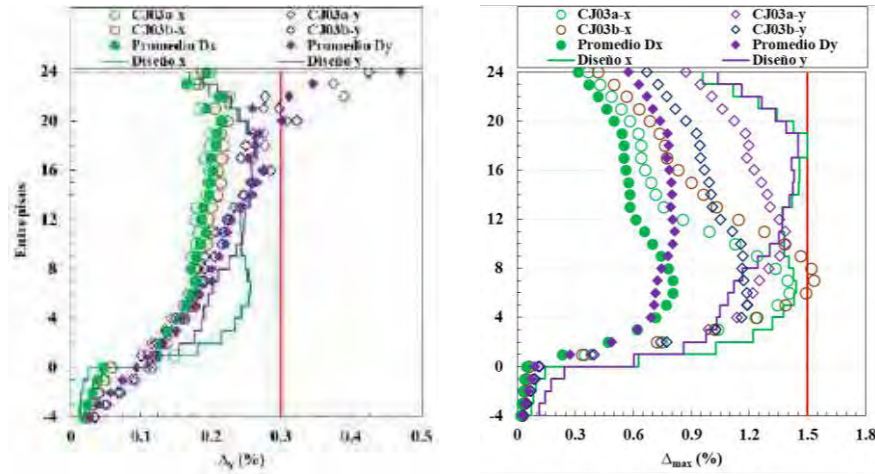


Figura 8.128. Distorsiones de fluencia y máximas, modelo de 24 niveles con base flexible

Si se comparan los resultados antes mencionados contra aquéllos generados con base flexible (figura 8.128), se observa que las distorsiones se amplifican a tal magnitud que hay un mayor número entrepisos que sobrepasan los máximos permisibles de diseño para los valores de Δ_y y de Δ_{max} . Se observa además que los valores promedios de los últimos cuatro entrepisos en la dirección y, tienen valores de δ ($Q'R/7$) > 0.003 . Por otra parte, se observa que algunos valores para Δ_{max} en la dirección x, son mayores a δ (QR) > 0.015 , y se presentan en los mismos entrepisos donde los ADAS desarrollan los valores máximos, y se encuentran ubicados en los entrepisos siete y ocho para el caso B de los registros de aceleración CJ03.

En la figura 8.129 se resume la respuesta global que desarrolla la estructura de 24 entrepisos con base rígida con los registros de aceleración CJ03 y la respuesta promedio de todos los pares de registros. Se aprecia de éstas que las respuestas máximas de cortante son un 28% mayor con respecto a las respuestas promedio, en los primeros entrepisos de ambas direcciones de análisis. El mismo efecto sucede con las ductilidades máximas por entrepiso que se registran por efecto de los registros CJ03, donde los máximos valores se obtienen cuando los disipadores ADAS desarrollan sus máximas ductilidades; aunque los valores promedio que obtienen son de $\mu_{max} < 4.0$, y dichos valores son menores para la dirección y. Igualmente, los valores promedio de las sobrerresistencias son muy similares entre sí en la mayoría de los entrepisos, aunque estos valores se encuentran entre $1.5 < V_y/V_{max} < 2.25$.

Por otra parte, se presenta en la figura 8.130 la respuesta global que desarrolla el modelo de 24 entrepisos con base flexible. Por ejemplo, los cortantes promedios que desarrollan cada entrepiso son muy similares, comparándolos con los obtenidos modelando su base como rígida, tanto para la consideración de la respuesta promedio, como de los máximos obtenidos con los registros denominados CJ03. Caso contrario sucede con los valores obtenidos para las sobrerresistencias promedio por entrepiso, donde considerar efectos de interacción suelo-estructura hace que el modelo amplifique este parámetro en un 13% y dicho aumento se incrementa hasta en un 20% para las consideraciones máximas en la dirección y. Estos cambios también se aprecian para los valores de μ_{max} donde los valores promedios ahora son del orden de $\mu_{max} < 5.0$.

En la figura 8.131 se presentan las respuestas asociadas a los ciclos inelásticos que el edificio de 24 entrepisos con base rígida genera. De manera general, se observa una distribución uniforme en la cantidad de ciclos histéreticos que se generan en la altura del edificio, donde la respuesta promedio genera que el 25% de éstos sean del tipo inelástico aproximadamente. No obstante, se aprecia también que con la respuesta máxima generada por los registros CJ03, se obtienen magnitudes del 45% y éstas se presentan del entrepiso tres al nueve en la dirección x , y del 11 al 21 en la dirección y .

Analizando las relaciones $K_{min}/K_{elástica}$ y $K_{prom}/K_{elástica}$, se observa que tanto para la respuesta promedio como para la máxima registrada, los valores en la dirección y son menores que los que se desarrollan en su dirección ortogonal. Además, se observa que los valores mínimos se desarrollan de los entrepisos cinco al ocho, que son donde se desarrollan las mayores ductilidades locales de los disipadores de energía tipo ADAS. Caso contrario sucede con los últimos cuatro entrepisos de la dirección y , donde los valores promedios evaluados son más cercanos a uno ($K_{min}/K_{elástica} \geq 0.9$), aunque con las consideraciones máximas éstos son de $K_{min}/K_{elástica} = 0.72$.

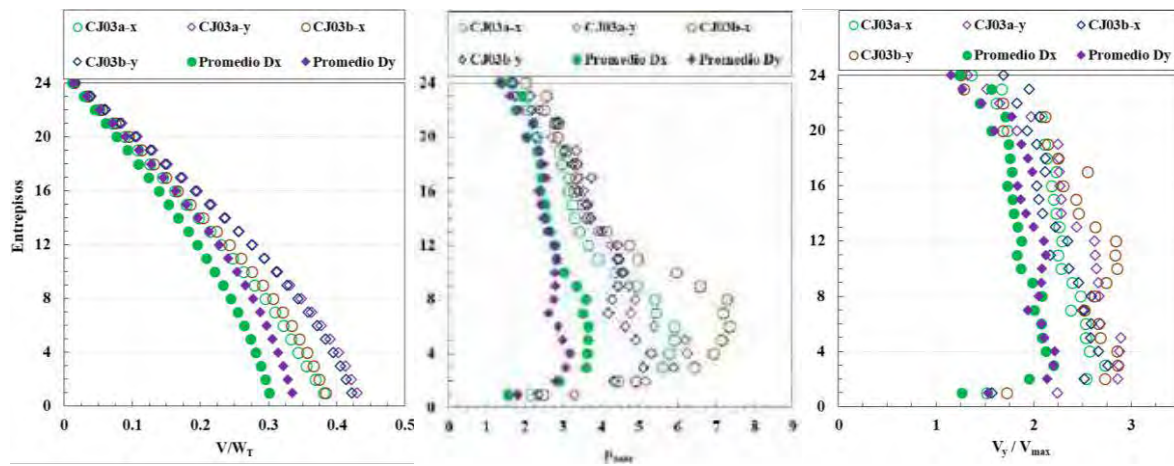


Figura 8.129. Resumen de la respuesta global, modelo de 24 niveles con base rígida

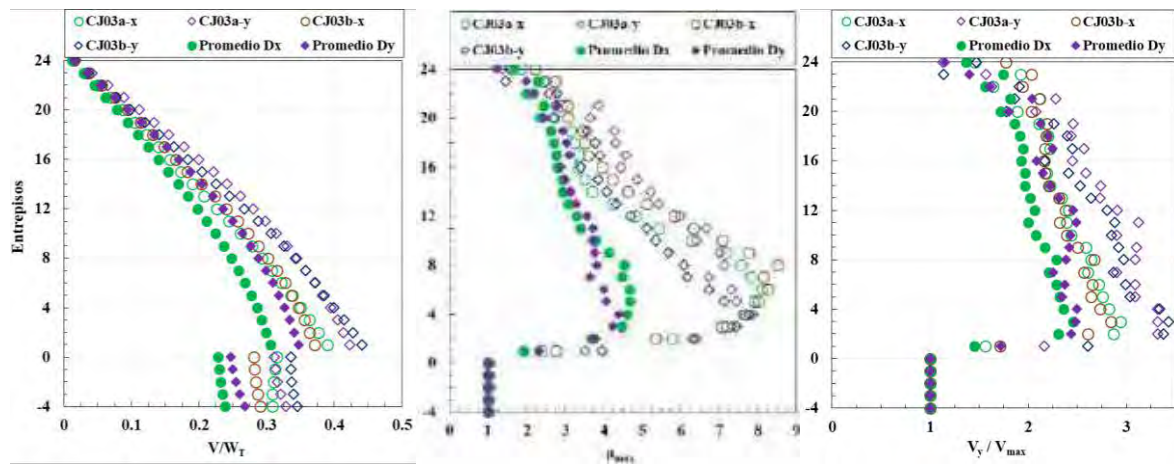


Figura 8.130. Resumen de la respuesta global, modelo de 24 niveles con base flexible

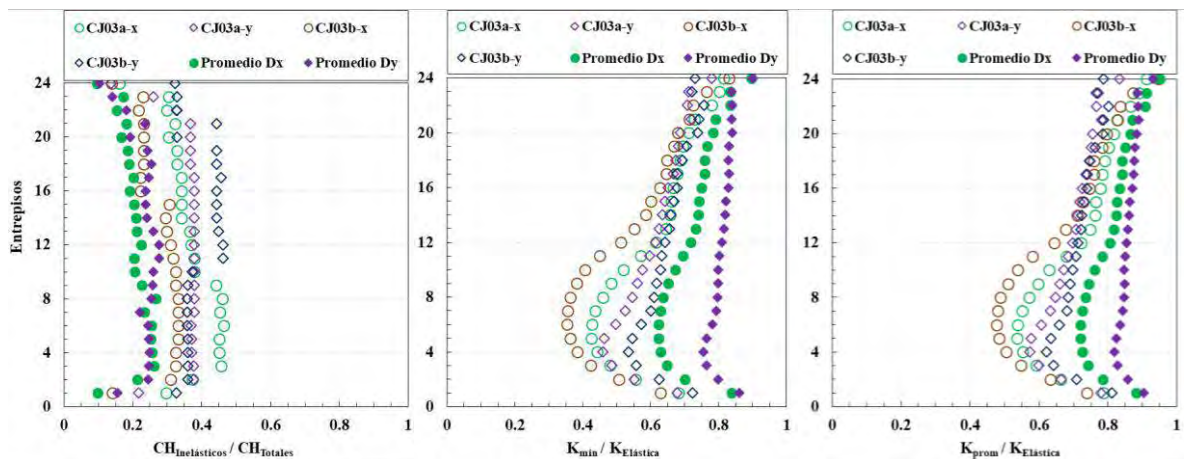


Figura 8.131. Resumen de los ciclos inelásticos para el modelo de 24 niveles con base rígida

Para los resultados promedios relacionados a los ciclos histeréticos del modelo con base flexible (figura 8.132), éstos se amplifican un 28% en promedio para la dirección y; sin embargo, esta relación entre los ciclos totales y los inelásticos aumenta hasta 0.68 en el entrepiso 21 con el caso A de los registros CJ03, debido a que es en este caso donde se presentan los valores máximos de rotación para las vigas. Aunque de manera general se aprecia que los valores permanecen con valores muy parecidos a los obtenidos del modelo con base rígida, se observa una amplificación de los valores en la respuesta máxima de la dirección y debido a la participación no lineal y no incipiente de las vigas en la misma dirección.

En la figura 8.133 se presentan las relaciones de distorsiones residuales para la respuesta máxima y la respuesta promedio del edificio de 24 entrepisos con base rígida. De manera general, se aprecia que la respuesta promedio en ambas direcciones, es mucho menor que las respuestas máximas obtenidas con los registros de aceleración que desarrollaron las ductilidades máximas locales en los disipadores. Además, se aprecia que los máximos valores para las distorsiones residuales promedio están en la dirección x con un valor máximo de 0.004% (d_r); sin embargo, el valor de este parámetro alcanza una magnitud de 0.018% en la dirección x y de 0.024% para la dirección y. En otras palabras, después del evento sísmico, el edificio con 24 entrepisos y base rígida tiene bajas probabilidades de quedarse con una deformación lateral permanente visible, a pesar que los valores reportados para este modelo son las más grandes obtenidas del presente trabajo. Dichas distorsiones residuales representan menos del 9% de la distorsión máxima de descarga, justo cuando sucede la distorsión máxima absoluta, aunque estos valores máximos se ubican en la parte media del edificio y aumentan hasta el 16% para el entrepiso siete con los registros de aceleración CJ03 en la dirección y. Finalmente, la relación entre la distorsión residual y la distorsión máxima son menores de 0.008, en la respuesta promedio de la estructura para la dirección x. Sin embargo, como se ha visto en este caso, las respuestas se amplifican en los casos cuando los disipadores desarrollan su ductilidad máxima y, por ende, los valores máximos de esta relación de distorsiones son de 0.028 en la dirección x y de 0.037 en la dirección y (figura 8.133).

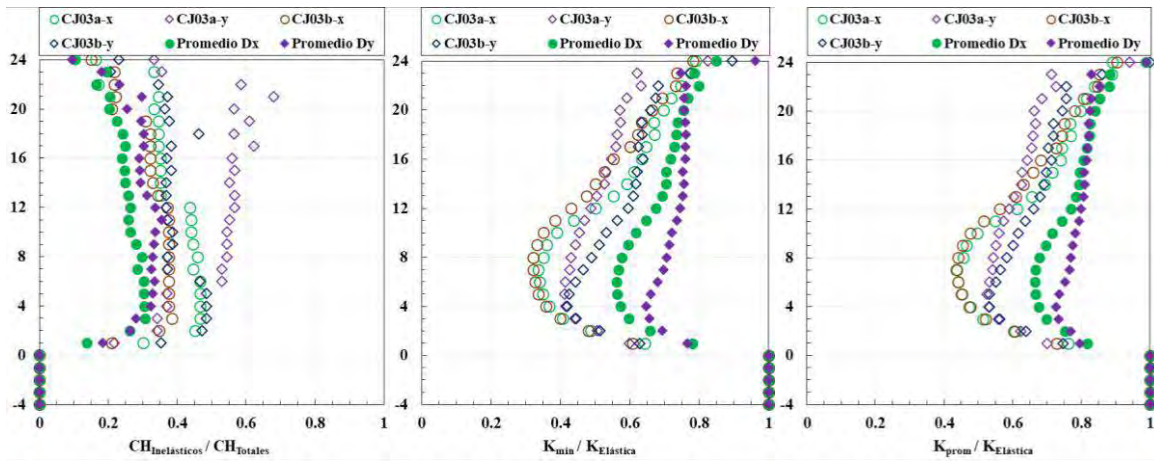


Figura 8.132. Resumen de los ciclos inelásticos para el modelo de 24 niveles con base flexible

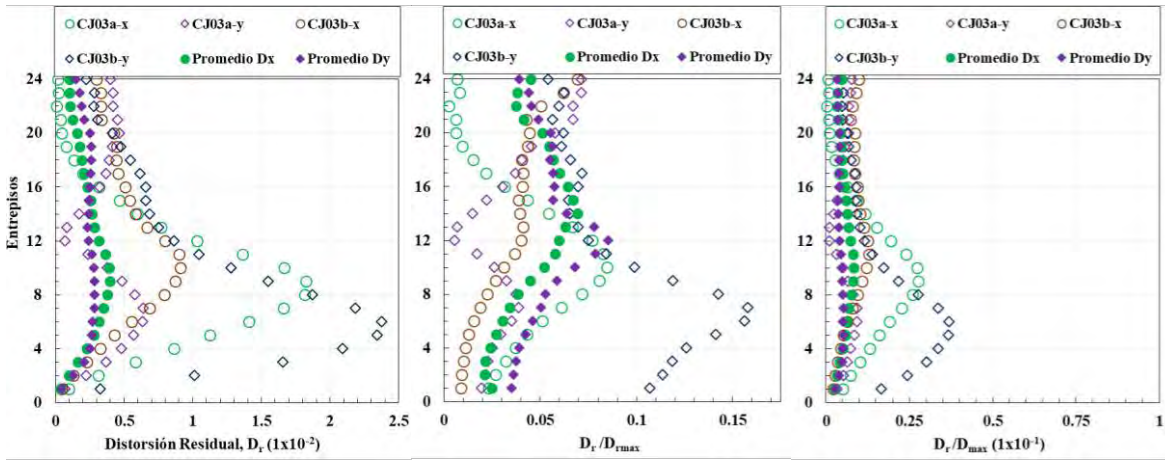


Figura 8.133. Distorsiones residuales absolutas y normalizadas máximas, modelo de 24 niveles con base rígida

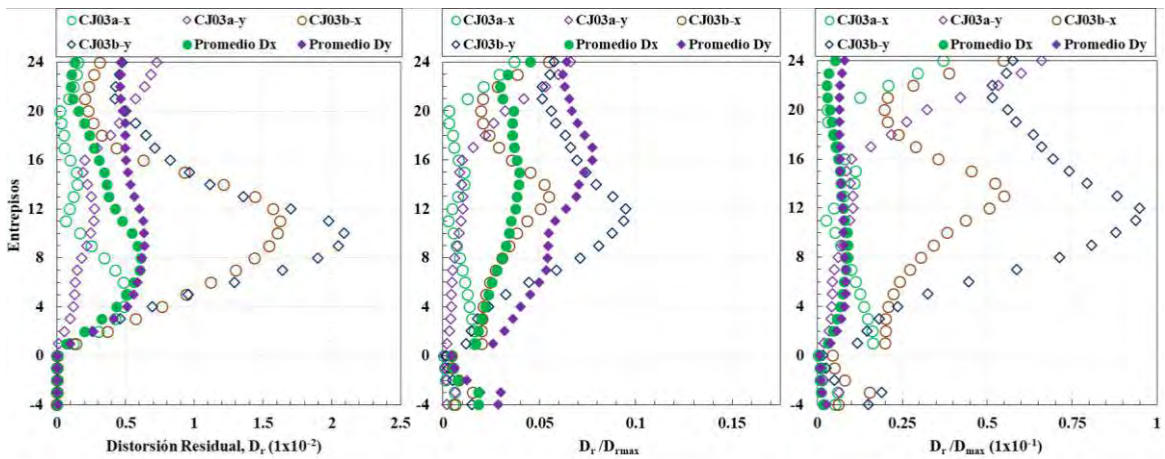


Figura 8.134. Distorsiones residuales absolutas y normalizadas máximas, modelo de 24 niveles y base flexible

En la figura 8.134 se presentan las relaciones de distorsiones residuales para el edificio de 24 niveles considerando sus niveles de sótano y los efectos de la interacción suelo-estructura. En primera instancia, se observa que la respuesta promedio en la dirección y se amplifica considerablemente para la segunda mitad de los entresijos del edificio, con respecto a los mismos parámetros analizados del modelo con base rígida. Sin embargo, se observa que los valores máximos de la distorsión residual se reducen un 12%, aunque la distribución de las distorsiones residuales cambia, dado que en el modelo con base rígida se presenta el valor máximo en el entresijo cinco, para el modelo con base flexible se presenta en el décimo entresijo. El mismo efecto sucede para la relación $d_r / d_{r,max}$ donde los valores máximos se reducen en un 40%, aunque la respuesta promedio se amplifica hasta en un 64% en el último entresijo, por ejemplo. Por último, la relación los valores máximos de d_r / d_{max} se amplifican por efecto del caso B de los registros CJ03 en la dirección y , y se aprecia un cambio en la distribución de que entresijos presentan los valores máximos. Además, se observa que la respuesta que se produce en la dirección x con el mismo caso se amplifica para los tres parámetros evaluados en esta sección.

8.7 Comentarios generales

En este capítulo se evaluó el comportamiento de los edificios tridimensionales, a partir de los resultados obtenidos de análisis dinámicos paso a paso no lineales, con una serie de pares de registros de aceleración representativos de la zona para la cual fueron diseñados los edificios. Con la evaluación y comparativa de los diferentes parámetros propuestos en la sección 8.3, se observó un desempeño estructural resiliente para todos los modelos con relación de esbeltez $H/L < 4.0$; incluso, cuando se tomó en cuenta en el diseño, el factor de corrección por irregularidad de $\alpha = 0.9$ en Q' por tener una relación de esbeltez de $H/L > 2.5$. Los disipadores de energía exhibieron un excelente comportamiento histerético para la mayoría de los casos analizados. De manera general, todos los disipadores presentan comportamiento no lineal, y salvo contadas excepciones, los disipadores del último nivel presentaban poca o nula participación inelástica que, como se ha demostrado en estudios recientes, sirven de protección adicional y de reserva para hacer frente a demandas mayores a las consideradas en su diseño, donde sí disipan energía (Tena-Colunga y Hernández-Ramírez 2017). Esto tuvo como consecuencia, en la respuesta global de la estructura, una gran cantidad de ciclos histeréticos inelásticos por entrepiso y que la rigidez promedio de éstos representaran hasta la mitad de su rigidez elástica en los entrepisos donde los disipadores desarrollaban su ductilidad máxima.

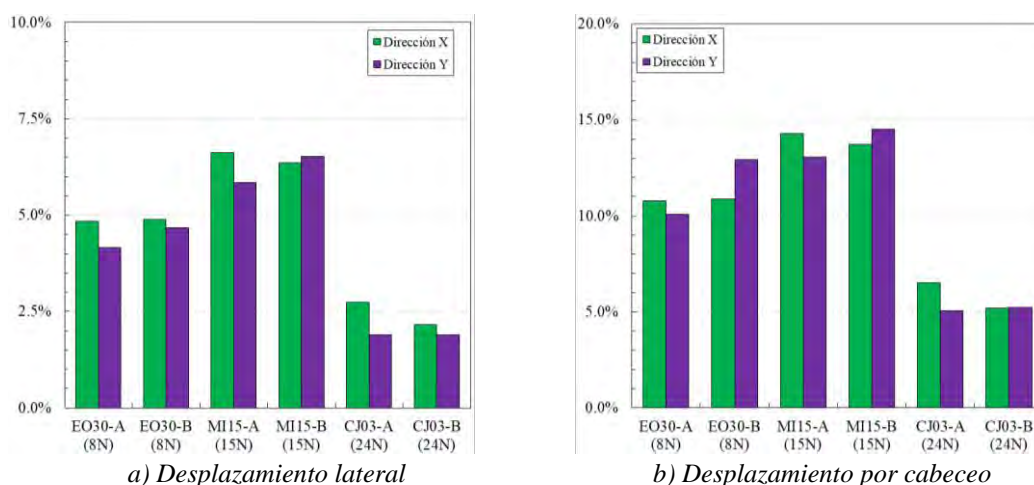


Figura 8.135. Desplazamiento de la estructura debido a la cimentación

De manera general, se observó que la respuesta de los edificios tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura tendía a amplificarse. En la figura 8.135 se grafican, con diagramas de barras, la participación del desplazamiento lateral y por efecto del cabeceo de la cimentación con respecto al de la azotea, en términos de porcentaje. Se grafican en éstas, los resultados de los registros de aceleración que generaron las respuestas máximas en los dispositivos ADAS y BRBs. En todos los casos, el desplazamiento lateral debido a la cimentación es mayor en la dirección x . Asimismo, se aprecia que este desplazamiento lateral es mayor con los registros de aceleración MI15, los cuales fueron inducidos al modelo de 15 entrepisos y en el que se usaron pilotes de punta.

También, se presenta la participación del cabeceo de la cimentación con respecto al desplazamiento total de los modelos evaluados a nivel de azotea (figura 8.135b). De manera general, se aprecia que en todos los casos, el porcentaje de participación es mayor con respecto a los obtenidos en la figura 8.135a; además, los máximos valores en la dirección y, se obtienen con los mismos registros para el modelo de 15 entresijos (MI15). En las figuras 8.136 y 8.137 se presentan los perfiles de desplazamiento de los edificios modelando la base como flexible; se aprecia de éstas la importancia de tomar en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura y los porcentajes de desplazamiento lateral y por cabeceo que aporta el sistema de cimentación.

Por otra parte, en ningún caso se presentaron fluencias de las columnas o de los contravientos de soporte. No obstante, algunas vigas presentaron fluencias muy incipientes, sobre todo en los marcos perimetrales que contienen a los dispositivos de disipación. En la mayoría de los casos, dichas fluencias representaban hasta el 10% de la rotación última del elemento en cuestión; sin embargo, se presentaron casos donde este nivel de fluencia aumentaba hasta el 15% cuando los disipadores desarrollaban su ductilidad máxima de diseño. Estos niveles están asociados a rotaciones residuales del .0066% y rigideces efectivas mínimas del 85%, por lo que el daño esperado y observable correspondería a fisuras de espesores mínimos, fácilmente reparables con resinas epóxicas.

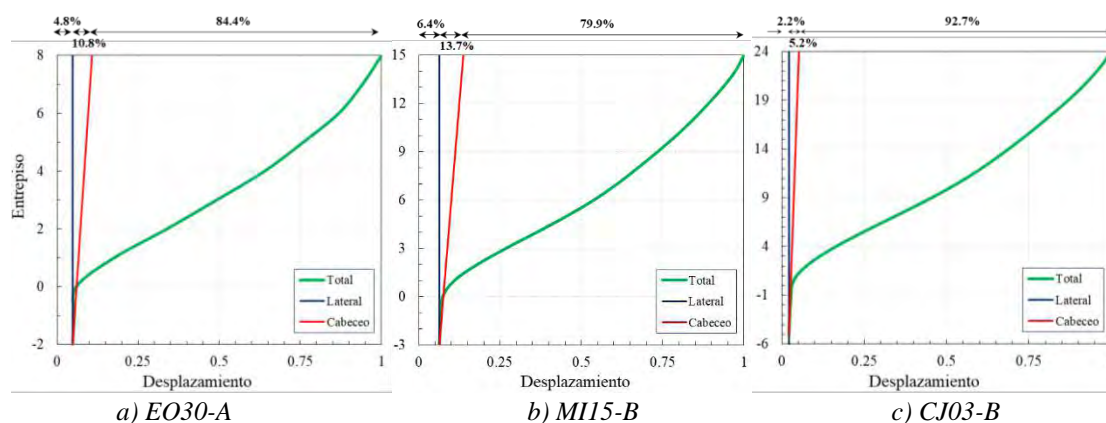


Figura 8.136. Perfiles de desplazamientos laterales dirección x

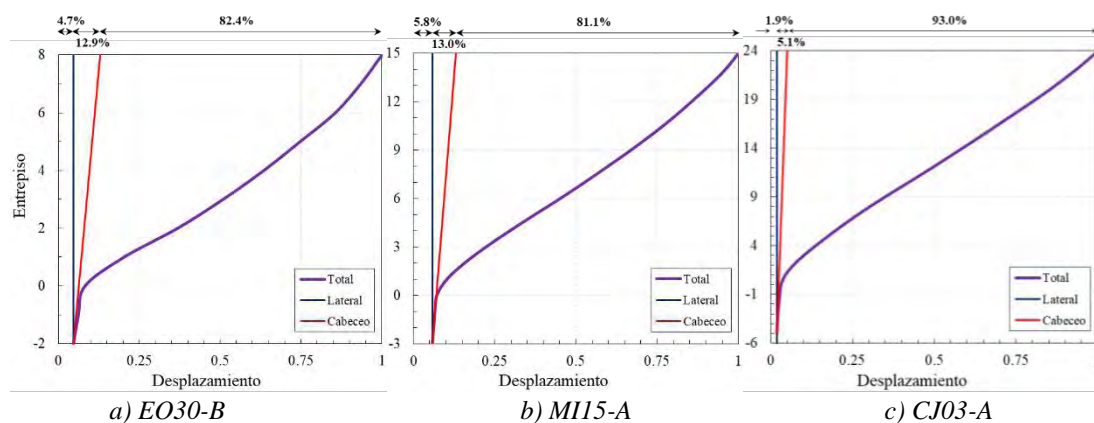


Figura 8.137. Perfiles de desplazamientos laterales dirección y

Las distorsiones relacionadas con el control de daño a los elementos del marco no rebasaron el límite permisible propuesto (Δ_{max}), incluso cuando se evaluaban las respuestas máximas de los pares de registros de aceleración, con excepción del modelo de 24 niveles con base flexible en la dirección x (figura 8.138). Por otro lado, en algunos de los últimos entrepisos del modelo más esbelto, se presentaron valores que sobrepasaban el límite permisible de la distorsión asociada a condiciones de servicio (Δ_y), incluso para la respuesta promedio del resultado de todos los registros de aceleración inducidos en la dirección x (figura 8.139).

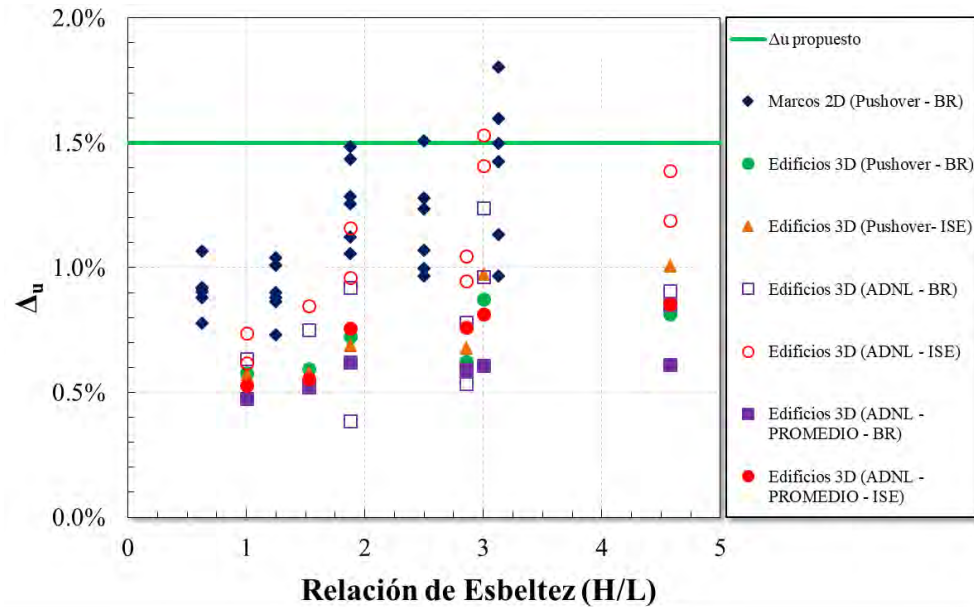


Figura 8.138. Comparativa de distorsión asociado a Δ_u con todos los modelos evaluados

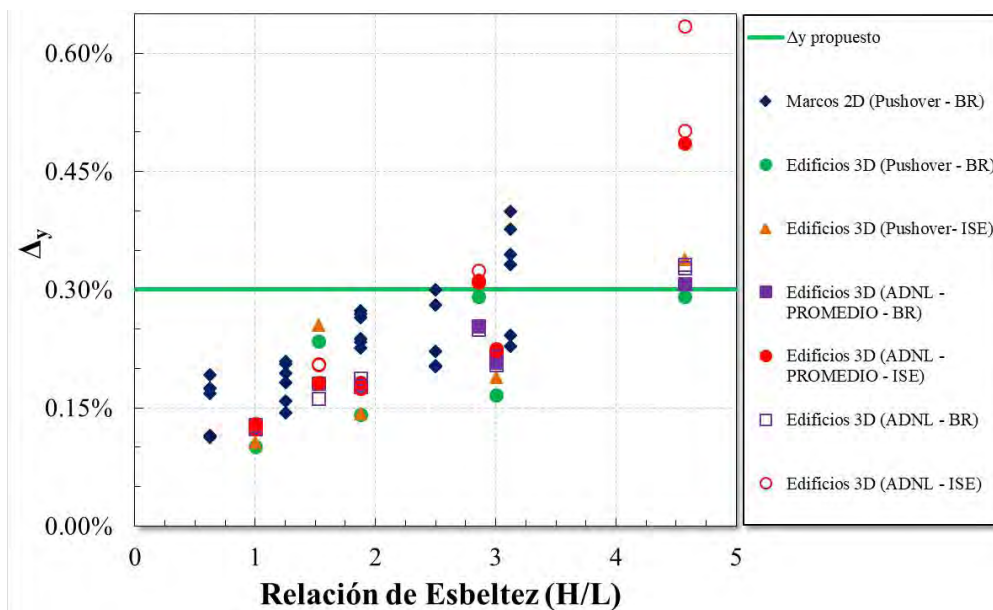


Figura 8.139. Comparativa de distorsión asociado a Δ_y con todos los modelos evaluados

Las máximas ductilidades de entrepiso (μ_{max}) se presentaron en los entrepisos donde los disipadores desarrollaban las ductilidades más altas. Por este motivo, se presenta en la figura 8.140 una comparativa de la ductilidad global que desarrollaron los modelos tridimensionales con los registros de aceleración. En esta figura, con recuadros y círculos se presentan los diferentes valores para cada dirección de análisis con cada uno de los pares de registros inducidos, que presentaron la respuesta máxima a los dispositivos de control, y con las mismas figuras pero iluminadas, la respuesta promedio de éstos. De manera general, se aprecia que los valores promedios obtenidos con los modelos con base rígida son menores que aquéllos con base flexible. Se grafica en esta misma figura, la tendencia que generaron todos los registros de aceleración; se aprecia de ésta que los valores de la ductilidad promedio se encuentran en un intervalo entre $3.5 < Q < 5.5$. No obstante, los valores promedio con base rígida son similares a la propuesta de diseño hecha ($Q=4.0$).

Asimismo, los valores de la sobrerresistencia desarrollada o demandada para los edificios evaluados en esta sección, fueron mayores a los supuestos en el proceso de diseño ($R \approx 1.5$), y los valores tienden a aumentar conforme la relación de esbeltez de los edificios aumenta también (figura 8.141). Se aprecia de esta misma figura que los valores promedio de la sobrerresistencia se encuentran en un intervalo entre $2.0 < R < 3.1$. Además, el tomar en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura aumenta el valor de este parámetro.

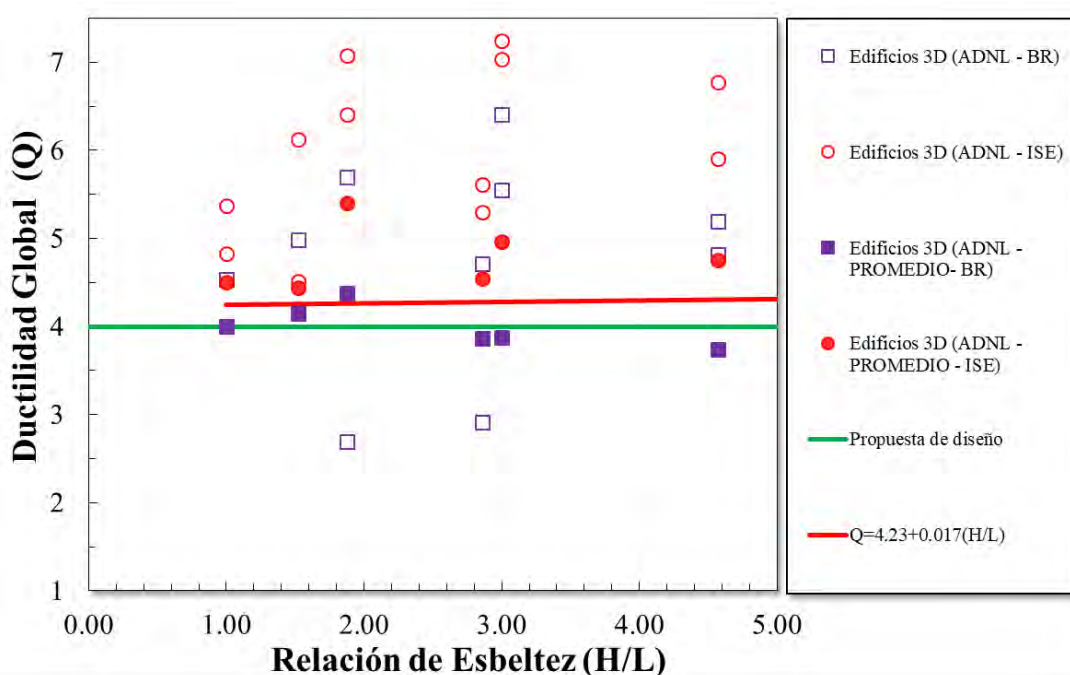


Figura 8.140. Comparativa de factor de reducción por ductilidad Q con modelos tridimensionales

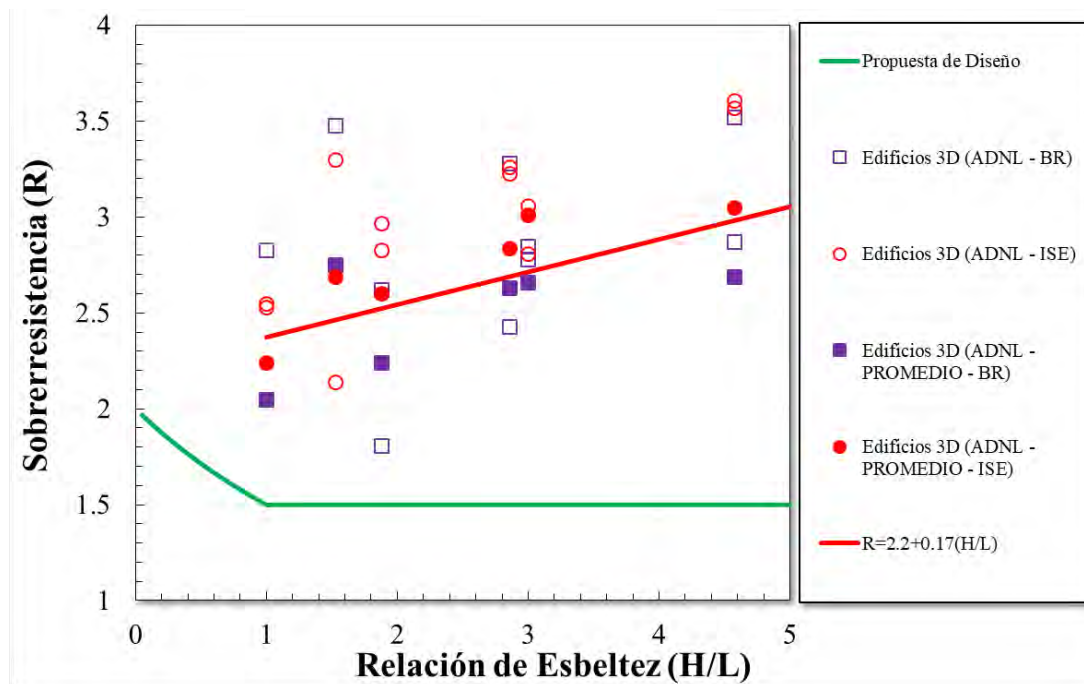


Figura 8.141. Comparativa de factor de reducción por sobrerresistencia R en modelos tridimensionales

La redundancia estructural se refiere a la cantidad de crujías en los marcos sismorresistentes que funcionan como líneas de defensa continuas ante las correspondientes cargas laterales, y teniendo como consecuencia un cierto grado de hiperestaticidad (Tena y Cortés 2014). Este parámetro se ha introducido en el Manual de Obras Civiles desde el 2008 para la reducción del espectro de diseño y está en función del número de crujías del edificio a evaluar. De trabajos previos, se ha observado que para marcos dúctiles no contraventeados, el impacto más importante de la redundancia es en la capacidad de deformación. Por otro lado, para marcos dúctiles con contravientos, el factor de sobrerresistencia es más significativo para la redundancia estructural (Tena *et al.* 2016).

En el presente trabajo, se ha calculado la redundancia en función de la ductilidad (ρ_{CD}) y de la sobrerresistencia (ρ_R) que desarrollan los modelos tridimensionales. Este procedimiento se realizó en función de los resultados de los análisis estáticos no lineales como de los dinámicos paso a paso. Para obtener el factor de redundancia ρ_R o ρ_{CD} , se normalizaron los parámetros de sobrerresistencia o ductilidad en la dirección x , donde se tiene cuatro crujías (dos de ellas con disipadores de energía), en función del resultado correspondiente que desarrolló su dirección ortogonal con tres crujías (dos de ellas con disipadores de energía), por ser éste último la dirección resistente menos redundante, que se tomó como referencia. Para ello, se evaluó el resultado que se desarrollaba con la componente más fuerte del par de registros de aceleración inducidos primero en la dirección x y luego con la misma componente en la dirección y (figura 8.142).

Se observa de la figura 8.143 que los valores de redundancia por ductilidad obtenidos con los análisis estáticos no lineales tienen una pendiente negativa a medida que aumenta la altura o relación de esbeltez de los modelos, dado que en este caso se limitó la deformación última del sistema para que los disipadores desarrollaran una ductilidad local máxima de 10. Por el contrario, para los análisis dinámicos paso a paso no lineales ante el par de registros de aceleración más demandantes tienen una tendencia positiva y en promedio tienden a 1.20 entre cuatro y tres crujías, dado que las demandas de ductilidad de los disipadores en algunos casos exceden de diez y, además de ellos, responden inelásticamente algunas vigas. Estas tendencias observadas para la redundancia entre marcos de cuatro y tres crujías para la ductilidad se observan también cuando se evalúan los valores de redundancia por sobrerresistencia (figura 8.144), aunque la pendiente que se obtiene en la tendencia con los resultados de los análisis dinámicos, es de mayor magnitud y el promedio de éstas tiende a 1.0. De manera general, se aprecia que para edificios de concreto reforzado con disipadores de energía en estudio, si se presentan capacidades de deformación y de sobrerresistencia adicionales por concepto de redundancia estructural, la cual depende fuertemente de la capacidad de deformación del sistema global estructural, que a su vez está en función de la ductilidad local que desarrollan los dispositivos de disipación de energía. Además, conforme el edificio se vuelve más flexible (en función de la relación global de esbeltez H/L o la altura), el impacto de la redundancia estructural aumentó ante excitaciones dinámicas, particularmente la redundancia por efecto de la sobrerresistencia, dado que como se planteó un objetivo de diseño sismorresistente resiliente, la estructura tiene reservas de resistencia y de deformación importantes si las solicitaciones sísmicas rebasan los considerados en su diseño.

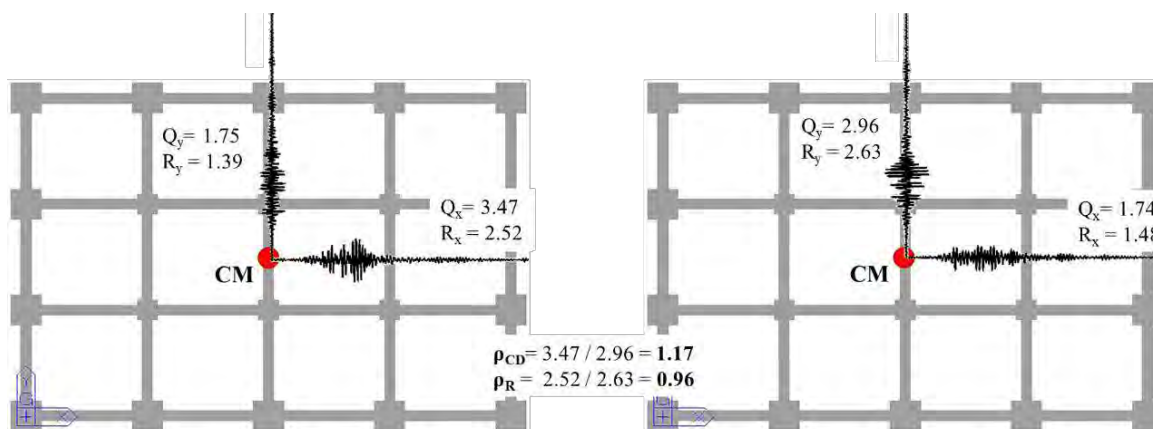


Figura 8.142. Cálculo de valores de redundancia

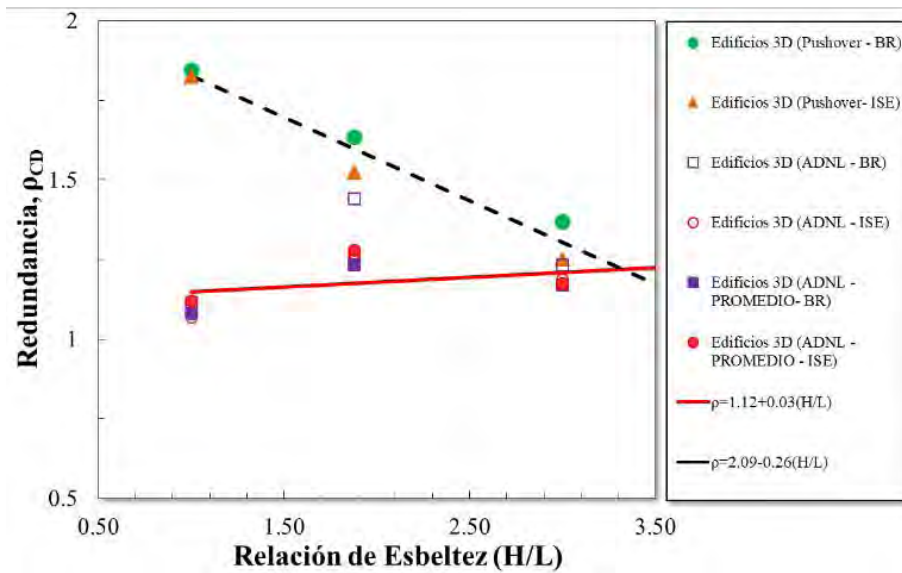


Figura 8.143. Valores de redundancia por ductilidad (Q)

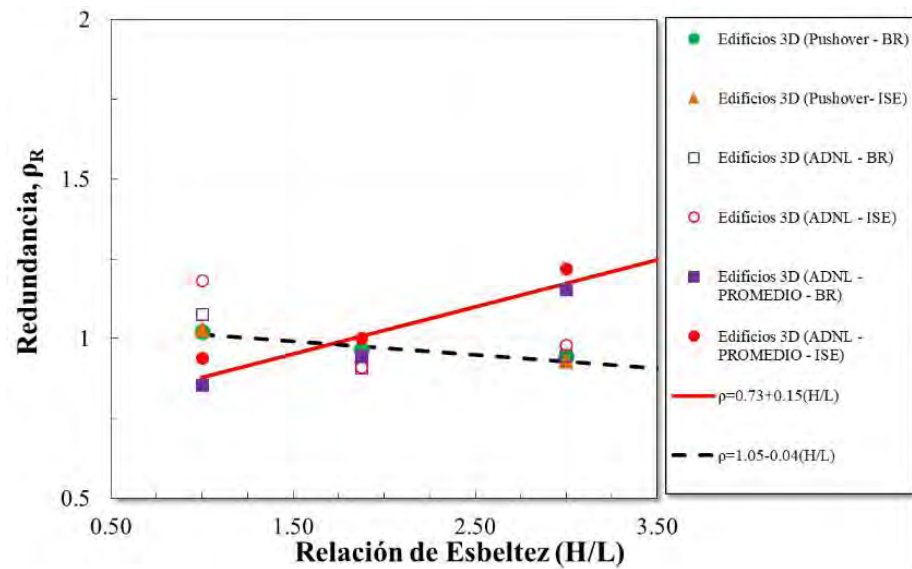


Figura 8.144. Valores de redundancia por sobrerresistencia (R)

9. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se estudió el comportamiento de estructuras de concreto reforzado con disipadores histeréticos de energía, éstos últimos colocados sobre contraventeo metálico en configuración Chevrón. A partir de una amplia investigación, se evaluó el desempeño estructural de diversos modelos analíticos, con el objetivo de plantear una metodología integral de diseño sísmico resiliente que garantice un comportamiento estructural eficiente, donde los dispositivos de disipación sean los únicos que desarrollen comportamiento no lineal importante, permitiendo como reserva y segunda línea de defensa inelástica la fluencia incipiente de algunas vigas, en dado caso que fuese necesario.

En primera instancia, se estudió el impacto de utilizar requisitos mínimos de detallado dúctil en el procedimiento de diseño con modelos simples de un grado de libertad, con el propósito de mitigar la participación inelástica en vigas y columnas, de los entrepisos donde los disipadores desarrollan su ductilidad máxima. Además, se valoró el comportamiento estructural variando el ángulo de contraventeo con respecto a la horizontal, a partir de una serie de análisis estáticos no lineales. Se observó de las curvas momento – rotación, que usar los requisitos mínimos de detallado dúctil, incrementa ligeramente la resistencia de las secciones, pero aumenta considerablemente la capacidad a rotación última de éstas; lo cual tuvo como consecuencia una disminución en la participación inelástica de los elementos del marco. También se observó que cuando se utiliza un confinamiento transversal dúctil, la ductilidad global que desarrolla el sistema completo disminuye cuando se limita la ductilidad máxima del disipador a $\mu=12$, que es a dicha ductilidad cuando se supuso que se desconecta del sistema de soporte. Además, conforme el sistema del marco aporta mayor rigidez al sistema global, el valor de Q tiende a disminuir. Los valores máximos desarrollados en los modelos de un grado de libertad tienden a cambiar en función del ángulo de contraventeo y del balance de rigidez α ; aunque éstos tienden a estar en un intervalo entre $4.5 \leq Q \leq 6.5$, y dichos valores son poco prácticos para proponer como parámetro sísmico para reducción del espectro de diseño. Por otra parte, los valores de sobrerresistencia desarrollados con estos modelos, tienden a incrementarse cuando se usa un detallado por confinamiento dúctil, aunque de manera general este valor se encuentra entre $1.5 \leq R \leq 2.0$.

Posteriormente, se analizaron sistemas de múltiples grados de libertad conformados por marcos planos, variando la altura de éstos en múltiples de cinco, teniendo como modelo más esbelto un marco plano con 25 entrepisos y relación de esbeltez $H/L = 3.125$. Además, se utilizaron distintos balances de rigidez (α y β) entre los sistemas involucrados, con el objetivo de proponer balances “óptimos” en función de la ductilidad máxima que los disipadores desarrollaban, de la relación de esbeltez de los modelos y de la participación inelástica de vigas y columnas. Cada uno de los elementos estructurales se diseñó a partir de un cortante basal proporcional al 10% del peso total del modelo en cuestión. Además, se cumplieron con los requisitos de resistencia estipulados en las Normas Técnicas Complementarias (NTC-04). Sin embargo, en esta etapa de la investigación no se revisó que cumplieran los requisitos de desplazamiento, dado que no existen valores dentro de la reglamentación nacional para este tipo de configuración estructural.

A partir de los resultados obtenidos de los análisis estáticos no lineales, se evaluó el desempeño estructural para los marcos planos agregando los requisitos mínimos de detallado dúctil como complemento adicional en el diseño. Se observó, de manera general, un desempeño estructural resiliente para la gran mayoría de los modelos evaluados, permitiendo que los elementos del marco tengan una participación no lineal casi imperceptible. Sin embargo, para los modelos más esbeltos (20 y 25 entrepisos), se presentaron fluencias incipientes en algunas columnas de las crujeas de la periferia cuando el aporte de rigidez del sistema contraviento-disipador es mayor ($\alpha = 0.25$). A partir de esta observación, se recomienda que conforme la relación de esbeltez de los marcos se incrementa (H/L), el aporte de rigidez que debe proporcionar el sistema del marco (α) debe ser mayor para impedir daño en vigas y columnas. La importancia del parámetro β (balance de rigidez entre contraviento y disipador) reside en la ductilidad desarrollada por los disipadores y su impacto en las demandas inelásticas del sistema del marco. En general, mientras el balance β disminuye, los disipadores tienden a desarrollar mayor magnitud de ductilidad local, pero esto también lidera a mayores demandas inelásticas en vigas y principalmente en columnas.

Al mismo tiempo, se distingue que el emplear de manera voluntaria los requisitos de confinamiento dúctil no impacta significativamente a los costos de construcción. Tomando en cuenta exclusivamente los costos directos asociados a la volumetría de las vigas y columnas de concreto reforzado, se obtuvo un aumento en costo de hasta el 15%, cuando se incrementa el peso de las barras de refuerzo transversal empleadas, como consecuencia del uso de un detallado dúctil. Por lo tanto, el impacto económico real es mucho menor, dado que no se incluyeron los costos del sistema de piso, de contravientos y disipadores (que son los mismos en los modelos sin confinamiento dúctil y con confinamiento dúctil), y los de la cimentación, que muy probablemente sería la misma también, dado que el incremento del peso total de los componentes del marco sería poco significativo. De la misma manera, los costos por mano de obra no deben incrementarse de manera importante, pues sólo involucran el habilitado y colocación de estribos adicionales en vigas y columnas antes del colado.

A partir de las curvas de cortante basal normalizado-distorsión global de azotea, se propusieron factores de comportamiento sísmico acorde con el reglamento utilizado en la Ciudad de México. Se distingue que el factor de comportamiento sísmico Q tiende a disminuir conforme el número de niveles aumenta, y se propone un valor de $Q=4.0$, para estructuras que cumplen la condición de regularidad por esbeltez ($H/L \leq 2.5$). Además, se observa que los valores de sobrerresistencia tienden a ser mayores para los modelos de menor altura, y que conforme va aumentando el número de niveles, éste valor tiende a $R=1.5$. De la misma forma, también se proponen valores de distorsiones máximas asociadas a la limitación de daños contra componentes no estructurales para sismos frecuentes (Δ_y) y para limitación de daños a los componentes estructurales del marco cuando los disipadores desarrollan su ductilidad máxima (Δ_u). Se proponen usar valores de $\Delta_y = 0.003$ para limitación de daño a elementos no estructurales; y de $\Delta_u = 0.015$ para limitación de daño a vigas y columnas ante el máximo sismo probable cuando los disipadores pudieran desarrollar su ductilidad máxima.

Previamente al uso de los factores de comportamiento sísmico propuestos para el diseño de modelos tridimensionales, se realizaron comparativas de respuestas no lineales obtenidas a partir de los resultados con dos diferentes programas de cómputo (DRAIN 2DX y MIDAS Gen). De manera general se observó que en un modelado tridimensional riguroso (Midas Gen), se presenta mayor rigidez de los nudos viga-columna, pues esa zona rígida se modela tomando en cuenta más grados de libertad, con lo cual impacta de manera significativa en la rigidez global de la estructura con respecto a la que puede hacerse en marcos planos (DRAIN-2DX), donde la zona rígida se modela en el plano conforme a la teoría general de elementos viga-columna. Asimismo, se han observado diferencias en las propiedades dinámicas de los modelos evaluados causados por la forma de modelar el disipador de energía (elementos viga-columna y elementos de liga). Dichas diferencias son más significativas cuando únicamente se modela la rigidez lateral del disipador y no se toman en cuenta las restricciones al giro del mismo; ésto genera que el modelo sea más flexible que lo reportado en trabajos experimentales. Sin embargo, se puede tener buena correlación entre los datos reportados experimentalmente, con respecto a los del modelado analítico, si se consideran los seis grados de libertad de manera acoplada del disipador, independientemente si se modela como elementos tipo viga-columna o como un resorte de desplazamiento.

Como se comentó al principio de esta sección, el objetivo primordial de este trabajo es ofrecer un procedimiento de diseño que sea fácil de adaptar a la filosofía de los reglamentos nacionales vigentes; por ende, se detalla el proceso de diseño para edificios tridimensionales, utilizando un análisis modal espectral y afectando al espectro de respuesta con los parámetros de reducción sísmicos asociados a la ductilidad (Q) y a la sobrerresistencia (R). Asimismo, se reportan las secciones de todos los elementos involucrados que cumplieron con los requisitos de resistencia acorde a las NTC-04; de la misma manera, se verificó que los requisitos de desplazamiento quedaran cubiertos acorde a los distintos niveles de limitación de daño propuestos también en el presente trabajo.

Debido a las condiciones de sitio peculiares que se presentan en la Ciudad de México, se toman en cuenta también los efectos de interacción suelo-estructura, tanto para el análisis y como para el diseño. El uso de este efecto se reflejó con el incremento del periodo de vibrar de la estructura y en el aumento de los desplazamientos y las demandas obtenidas.

Además, se usaron distintos balances de rigidez entre el disipador y el contraviento (β) para cada dirección de análisis, con el objetivo de evaluar el comportamiento de dos configuraciones de disipadores histeréticos de energía. Para las crujeas en la dirección x se usaron elementos disipadores de energía representativos de un $\beta=0.50$ (ADAS). Para los disipadores en dirección y , se utilizaron contravientos restringidos contra pandeo, los cuáles son representativos de un $\beta=1.0$. Se observó que las secciones propuestas de los contravientos, para los modelos de 15 y 24 niveles, se diseñaron a menos del 50% de su capacidad; pero cabe recordar que para que el disipador de energía desarrolle su ductilidad máxima, los contravientos de soporte deben permanecer elásticos durante todo el evento sísmico.

El diseño por resistencia de vigas y columnas se hace conforme a los requisitos establecidos para marcos con ductilidad limitada ($Q=2$), pero agregando los requisitos mínimos para el refuerzo transversal de marcos dúctiles ($Q=4$). En otras palabras, no se tiene que seguir el proceso completo de diseño para un marco dúctil, sino revisar que el diámetro, ramas y separación de los estribos sea tal que asegure una mayor capacidad de deformación en la zona donde se espera que se plastifique la sección. Con el objetivo de asegurar un desempeño estructural resiliente, se tomó en cuenta una nueva combinación de carga para el diseño de las columnas con descarga axial del sistema contraviento-disipador.

Se observó, a partir de los diseños obtenidos con los modelos tridimensionales, que éstos son más rígidos que los marcos planos estudiados en el capítulo cuatro. Esto es consecuencia de limitar la distorsión última que los modelos desarrollarán, por el modelado tridimensional riguroso para la zona rígida, y en conjunto con la nueva combinación de carga impuesta a las columnas conectadas al sistema contraviento – disipador de modelos esbeltos.

A partir de los resultados obtenidos de análisis no lineales, se evaluó el comportamiento de los edificios tridimensionales y la justificación de los parámetros sísmicos propuestos. Como primera etapa, se realizaron análisis estáticos no lineales con dos diferentes patrones de carga que fuesen representativos de una distribución de carga estática y dinámica. De manera general, se observó un comportamiento estructural resiliente para casi todos los modelos evaluados, donde la mayor participación no lineal se concentró en los dispositivos ADAS y BRBs, con fluencias incipientes en vigas, mientras que las columnas y los contravientos permanecieron elásticos. Los efectos de interacción suelo-estructura provocaron que más dispositivos de disipación desarrollaran una ductilidad cercana a la última, aunque la rotación de las vigas también aumentaron. La variación del patrón de cargas presentó diferencias en los resultados para el edificio más esbelto (24 entrepisos); donde se observa que el usar un patrón de carga estática hace que las columnas en la dirección x presenten fluencia incipiente, caso que no se presenta con el patrón de carga modal.

Los valores de ductilidad global desarrollados por los modelos tridimensionales fueron menores que los desarrollados para los marcos planos, mientras que los valores de sobrerresistencia fueron mayores a los supuestos en el proceso de diseño ($R \approx 1.5$); sin embargo, las diferencias en el modelado de la base de los edificios hacen que el valor de R sea menor cuando se toman en cuenta los efectos de interacción-suelo estructura para relaciones de esbeltez $H/L < 3.0$. Las diferencias en el comportamiento entre los marcos planos y los edificios tridimensionales se deben principalmente a la limitación de las distorsiones permisibles, al modelado de las zonas rígidas en tres dimensiones y al diseño formal de los dispositivos ADAS y BRBs, principalmente.

En la segunda etapa, se evaluó el comportamiento de los mismos edificios, a partir de los resultados obtenidos de una serie de análisis dinámicos paso a paso no lineales, con ocho pares de registros de aceleración representativos de las zonas para los que fueron diseñados.

La forma en la que se indujeron estos registros de aceleración fue de manera simultánea y alternando la dirección de éstos. Con la evaluación y comparativa de los diferentes parámetros propuestos y obtenidos a partir de los ciclos histeréticos (disipador, entrepiso y globales de la estructura), se observó un desempeño estructural resiliente para todos los modelos con relación de esbeltez $H/L < 4.0$. Los disipadores de energía exhibieron un excelente comportamiento histerético y en algunos casos, éstos rebasaron la ductilidad máxima para la cual fueron diseñados. Esto tuvo como consecuencia una gran cantidad de ciclos histeréticos inelásticos en cada entrepiso y que las máximas ductilidades de entrepiso (μ_{max}) se presentaran en los entrepisos donde los disipadores desarrollaban las ductilidades más altas. Al igual que para los análisis estáticos no lineales, se observó que la respuesta de los edificios tendía a amplificarse tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura. Conjuntamente, se observó que el desplazamiento ocasionado por el cabeceo de la cimentación es mucho mayor que aquél generado por el desplazamiento lateral de ésta.

De los mapeos de fluencia inelásticas se observó que para todos los casos las columnas y los contravientos de soporte permanecieron elásticos durante toda la excitación sísmica. No obstante, algunas vigas presentaron fluencias incipientes, sobre todo en los marcos perimetrales que contienen a los dispositivos de disipación. En la mayoría de los casos, dichas fluencias máximas no eran mayores del 15% de la rotación última del elemento en cuestión, y están asociados a rigideces secantes del 85% de la rigidez elástica. Sin embargo, cuando se evaluaron las fluencias residuales, la magnitud de estas rotaciones disminuyen notablemente y, en algunos casos, son despreciables debido a que las rotaciones residuales fueron de magnitudes muy pequeñas; por lo que el daño esperado y observable correspondería a fisuras de espesores mínimos, fácilmente reparables.

Las distorsiones relacionadas con el control de daño a los elementos del marco no rebasaron el límite permisible propuesto (Δ_{max}), incluso cuando se evaluaban las respuestas máximas de los pares de registros de aceleración. Por otro lado, en algunos de los últimos entrepisos del modelo más esbelto, se presentaron valores que sobrepasaban el límite permisible de la distorsión asociada a condiciones de servicio (Δ_y), incluso para la respuesta promedio del resultado de todos los registros de aceleración inducidos.

La demanda de ductilidad global de la estructura (Q), obtenidos de los diversos análisis dinámicos no lineales paso a paso, se encuentran en un intervalo entre $3.1 < Q < 5.6$, donde los valores promedios obtenidos con los modelos con base rígida son menores que aquéllos obtenidos con base flexible. Cabe señalar que los valores promedio con base rígida son similares a la propuesta de diseño hecha ($Q=4.0$), entre otras razones, porque la propuesta se hizo con base en los resultados de modelos empotrados en su base.

De la misma forma que con los resultados obtenidos de los análisis estáticos no lineales, los valores de la sobrerresistencia desarrolladas con los análisis dinámicos paso a paso no lineales fueron mayores a los supuestos en el proceso de diseño ($R \approx 1.5$); éstas se encuentran en un intervalo entre $1.9 < R < 3.4$.

Es importante mencionar también que los valores de los factores de redundancia estructural por ductilidad y por sobrerresistencia obtenidos para los edificios tridimensionales evaluados están estrechamente ligados a su capacidad de deformación. Además, la variación de resultados y tendencias entre los distintos tipos de análisis no lineales efectuados se debe a que en los análisis estáticos no lineales se limitó la ductilidad local de los disipadores a un máximo de 10, congruente con la filosofía de diseño sismorresistente resiliente propuesta. En cambio, en los análisis dinámicos paso a paso la estructura debe responder y resistir a las excitaciones impuestas, que pueden rebasar a las consideradas en su diseño. Cuando esto sucedió, la estructura respondió adecuadamente con capacidades de deformación inelástica y de resistencia adicionales, teniendo mayor capacidad en la dirección con un mayor número de líneas de defensa y, por ello, los factores de redundancia por ductilidad y por sobrerresistencia resultaron mayores.

A pesar que para algunos casos las ductilidades y las distorsiones de entrepiso máximas eran de gran magnitud, las distorsiones residuales reportadas después del evento sísmico son pequeñas ($d_r = 0.024\%$). En otras palabras, después del evento sísmico los edificios con disipadores de energía tienen bajas probabilidades de quedarse con una deformación lateral permanente visible y que requiera que el inmueble quede fuera de operación para evaluar su seguridad estructural.

Finalmente, con la evaluación de los diferentes modelos analizados y con distintos tipos de análisis no lineales, se concluye que la metodología de diseño (basado en el uso de balances de rigidez entre el sistema del marco y del sistema contraviento-disipador), y los respectivos factores de comportamiento sísmico propuestos, son ideales para liderar desempeños estructurales resilientes; debido a que se logran los mecanismos resilientes propuestos, donde los disipadores de energía son los primeros en fluir y cuando desarrollan su ductilidad local máxima, se presentan algunas fluencias incipientes en vigas que son fáciles de reparar y que no afectan la operación del edificio, incluso para modelos esbeltos con una relación de esbeltez máxima de $H/L < 4.0$.

La metodología propuesta es además robusta y fue planeada para insertarse fácilmente en los reglamentos vigentes de diseño sismorresistente con base en el método de las fuerzas, no únicamente de México, sino del mundo, por lo que constituye una aportación importante y valiosa de cara a evolucionar hacia reglamentos de diseño sísmico resilientes en el futuro cercano.

10. REFERENCIAS

- Avilés, J y L E Perez-Rocha (1998). "Site effects and soil-structure interaction in the Valley of Mexico". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 17, pp. 29-39.
- Avilés, J y L E Perez-Rocha (2004). "Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura". *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 71, pp. 1-36.
- Avilés, J y L E Perez-Rocha (2005). "Design concepts for yielding structures on flexible foundation". *Engineering Structures*, No. 27, pp. 443-454.
- Aguiar R., Rodríguez M., y Mora D. (2016), "Análisis sísmico de estructuras con disipadores de energía ADAS o TADAS", *Monografía CIMNE IS-75*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España.
- Aguiar, R (2016), "Reforzamiento del bloque estructural del parqueadero de la ULEAM afectada por el terremoto del 16 de Abril de 2016", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 21, No. 3, pp. 301-317.
- Aguiar, R (2018), "Análisis de disipadores TADAS utilizados en reforzamiento de hospital Rodríguez Zambrano de Manta", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-28.
- Aguirre, M y R Sánchez (1992). "Structural seismic damper", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 5, pp. 1158-1171.
- Almeida, A, R Ferreira, J M Proença y A S Gago (2017), "Seismic retrofit of RC building structures with Buckling Restrained Braces", *Engineering Structures*, Vol. 130, pp. 14-22.
- Bai, J y J Ou (2016), "Earthquake-resistant design of buckling-restrained braced RC moment frames using performance-based plastic design method", *Engineering Structures*, Vol. 107, pp. 66-79.
- Benavent-Climent, A (2010), "A brace-type seismic damper based on yielding the walls of hollow structural sections", *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 1113-1132.
- Benavent-Climent, A (2011), "An energy-based method for seismic retrofit of existing frames using hysteretic dampers", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, pp. 1385-1396.
- Benavent-Climent, A, y S Mota-Páez (2017), "Earthquake retrofitting of R/C frames with soft first story using hysteretic dampers: Energy-based design method and evaluation", *Engineering Structures*, Vol. 137, pp. 19-32.
- Calado, L, J Proença, M Espinha y C Castiglioni (2013), "Hysteretic behaviour of dissipative bolted fuses for earthquake resistant steel frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 85, pp. 151-162.

Castiglioni, C, A Kanyilmaz y L Calado (2012), “Experimental analysis of seismic resistant composite steel frames with dissipative devices”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 76, pp. 1-12.

Castillo, T, y S. E. Ruiz (2014), “Reduction factors for seismic design spectra for structures with viscous energy dampers”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 18, pp. 323-349.

Centro de Estudios Económicos del Sector de la Construcción (2016), “Análisis sobre el impacto en el precio del Acero en el Mercado Nacional”, *Boletín CEESCO*, pp. 1-16.

Ciampi, V, A Paolone y M De Angelis (1992), “On the seismic design of dissipative bracings”, *Proceedings, Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain, 4133-4138.

Ciampi, V, A, M De Angelis y F Paolacci (1995), “Design of yielding or friction-based dissipative bracings for seismic protection of buildings”, *Engineering Structures*, Vol. 17, No. 5, pp. 381-391.

Chalco, D. M. (2014), “Análise sísmica de pórticos planos com Dissipadores metálicos de energia”, *Master Thesis*, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, (Portugués).

Chan, R y F Albermani (2008), “Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation”, *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 1058-1066.

Coeto G (2013), “Comparativa de edificio de hospital en Acapulco, Guerrero usando a)contravientos concentricos convencionales y b)contravientos restringidos contra pandeo (crp)”, *Memorias, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Boca del Río, Veracruz, CDROM, noviembre.

De la Llera, J C, C Esguerra y J L Almazán (2004), “Earthquake behavior of structures with copper energy dissipators”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 33, pp. 329-358.

Di Sarno, L y G Manfredi (2010), “Seismic retrofitting with buckling restrained braces: Application to an existing non-ductile RC framed building”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 30, pp. 1279-1297.

Durucan, C y M Dicleli (2010), “Analytical study on seismic retrofitting of reinforced concrete buildings using steel braces with shear link”, *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 2995-3010.

Esteva, L y L Veras (1998), “Criterios de ductilidad y desempeño para el diseño sísmico de estructuras con disipadores histeréticos de energía”, *Memorias, V Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica*, Toluca, septiembre.

Foti, D, L Bozzo y F López-Almansa (1998), “Numerical efficiency assessment of energy dissipators for seismic protection of buildings”, *Earthquake Engineering and Strutural Dynamics*, Vol. 27, pp. 543-556.

FEMA 273 (1997), “NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings”, *Federal Emergency Management Agency*, Washington DC, 1997.

Gang, L, J Yi, Z Shuchuan, Z Yang y L Qiang (2015), “Seismic design or retrofit of buildings with metallic structural fuses by the damage-reduction spectrum”, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 14, pp. 85-96.

Ghabraie, K, R Chan, X Huang y Y Xie (2010), “Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy”, *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 2258-2267.

Godínez, E A (2005), “Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras existentes en el Distrito Federal. El caso específico del sismo del 19 de septiembre de 1985”, *Tesis de Maestría*, Posgrado en Ingeniería Estructural, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.

Godínez, E A (2010), Estudio del comportamiento de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo concéntrico. *Tesis de Doctorado*, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.

Godínez, E A y A Tena (2011), “Comportamiento no lineal de marcos dúctiles de concreto reforzado con contraventeo chevrón. Propuesta de diseño”, *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 85, pp. 61-102, <https://doi.org/10.18867/ris.85.30>.

Gómez, C, M Ordaz, y A Tena (2005), “Leyes de atenuación en desplazamiento y aceleración para el diseño sísmico de estructuras con aislamiento en la costa del pacífico”, *Memorias, XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, México, DF, CDRom, Artículo No. II-02, pp. 1-18, septiembre.

González, R (1990), “Respuesta de estructuras provistas de dispositivos externos de disipación de energía tipo solera”, *Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS*, No. 40, pp. 47-74.

González, O y F Robles (2005), *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*, cuarta edición, Limusa, México. ISBN: 968-186-4468

Habibi, A, R Chan y F Albermani (2013), “Energy-based design method for seismic retrofitting with passive energy dissipation systems”, *Engineering Structures*, Vol. 46, pp. 77-86.

Henry, R S, S Sritharan y J M Ingham, (2016), “Residual drift analyses of realistic self-centering concrete wall systems”, *Earthquakes and Structures*, Vol. 10, No. 2, pp. 409-428.

Hsu, H L y H Halim (2017), “Improving seismic performance of framed structures with steel curved dampers”, *Engineering Structures*, Vol. 130, pp. 99-111.

Housner, G W, L A Bergman, T K Caughey, A G Chassiakos, R O Claus, S F Masri, R E Skelton, T T Soong, B F Spencer y T P Yao (1997), “Structural control: past, present, and future”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 9, pp. 897–971.

- Jara, J, E Miranda y G Ayala (2007), “Parametric study of single-degree-of-freedom systems with energy dissipating devices built on soft soil sites”, *Engineering Structures*, Vol. 29 , pp. 1398-1413.
- Jara, J (2009), “Seismic response of buildings with energy dissipating systems built in soft soils”, *Engineering Structures*, Vol. 31, pp. 1204-1216.
- Kang, J-D, y Y Mori (2017), “Evaluation of a simplified method to estimate the peak inter-story drift ratio of steel frames with hysteretic dampers”, *Applied Sciences*, Vol. 7, No. 5, pp. 1–15.
- Kasai, K, Y Fu, y A Watanabe (1998), “Passive Control Systems for Seismic Damage Mitigation”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 5, pp. 501–512.
- Khampanit, A, S Leelataviwat, J Kochanin y P Warnitchai (2014), “Energy-based seismic strengthening design of non-ductile reinforced concrete frames using buckling-restrained braces”, *Engineering Structures*, Vol. 81, pp. 110-122.
- Kim, J, y H Choi (2004), “Behavior and design of structures with buckling-restrained braces”, *Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 693-706.
- Lin, YY, MH Tsai, JS Hwang y KC Chang (2003), “Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems”, *Engineering Structures*, Vol. 25, pp. 25-37.
- Lu, X, Y Chen, y H Jiang (2018), “Earthquake Resilience of Reinforced Concrete Structural Walls with Replaceable Fuses”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 801–825.
- Mahmoudi, M y MG Abdi (2012), “Evaluating response modification factors of TADAS frames”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 71, pp. 162-170.
- Martinez-Romero, E. (1993), “Experiences on the use of supplementary energy dissipators on buildings structures”, *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 581-625.
- Martínez, E (1994), Comunicación personal del Dr. Arturo Tena Colunga con el Ing. Martínez Romero.
- Mazza, F (2014), “Displacement-based seismic design of hysteretic damped braces for retrofitting in-plan irregular R.C. framed structures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 66, pp. 231-240.
- Mazza, F, M Mazza y A Vulcano (2015), “Displacement-based seismic design of hysteretic damped braces for retrofitting in-elevation irregular R.C. framed structures”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 69, pp. 115-124.
- MIDAS (2017), *Integrated design systems for buildings and general structures*, MIDAS Gen v.2.1, Midas Information Technology Co. Ltd.
- Nangullasmú, H J (2011), “Propuesta de criterios de diseño sísmico conforme a reglamento para marcos no dúctiles de concreto reforzado con disipadores histeréticos”, *Tesis de*

Maestría, Posgrado en Ingeniería Estructural, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.

NTCC-04 (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Concreto”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal, Tomo II*, No. 103-BIS, octubre.

NTCE-04 (2004), “Normas Técnicas Complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las Edificaciones”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal, Tomo II*, No. 103-BIS, octubre.

NTCM-04 (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras Metálicas”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal, Tomo II*, No. 103-BIS, octubre.

NTCS-04 (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal, Tomo II*, No. 103-BIS, octubre.

NTCS-17 (2017), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo”, *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, No. 220-BIS, diciembre.

MOC-2008 (2009), *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo*, Instituto de Investigaciones Eléctricas y Comisión Federal de Electricidad, México, noviembre.

MOC-2015 (2015), *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo*, Instituto de Investigaciones Eléctricas y Comisión Federal de Electricidad, México, noviembre.

Oh, S H, Y J Kim y H S Ryu (2009), “Seismic performance of steel structures with slit dampers”, *Engineering Structures*, Vol. 31, pp. 1997–2008.

Oviedo, J A, M Midorikawa y T Asari (2010), “Earthquake response of ten-story story-drift-controlled reinforced concrete frames with hysteretic dampers”, *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 1735–1746.

Park, R y T Paulay (1986), *Estructuras de Concreto Reforzado*, Limusa, México. ISBN-13: 9789681801007

Pérez Rocha, L. E. (1994). Comunicación personal con el Dr. Arturo Tena Colunga

Prakash, V, G H Powell y F C Fillipou (1992), “DRAIN-2DX: base program user guide”, *Report No. UBC/SEMM-92/29*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.

Qian, X (2017), “Development of a High-Performance Steel Plate Shear Wall System with an Innovative Gusset Plate Moment Connection”, *Tesis de Doctorado*, Universidad de California, Berkeley, otoño.

Rai, D, P Annam y T Pradhan (2013), “Seismic testing of steel braced frames with aluminum shear yielding dampers”, *Engineering Structures*, Vol. 46, pp. 737-747.

Riobóo, J M (1995), “Estructuras de concreto”, *Memorias, Simposio Internacional: La ingeniería civil a 10 años de los sismos de 1985*, México, D.F, septiembre, pp. 123-127.

Ruiz, S E e H Badillo (2001), "Performance-Based design approach for seismic rehabilitation of buildings with displacement-dependent dissipators", *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 3, pp. 531-548.

Ruiz, J y E Miranda (2006), "Evaluation of residual drift demands in regular multi-storey frames for performance-based seismic assessment", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, pp. 1609-1629.

Sahoo, D R y S-H Chao (2010), "Performance-based plastic design method for buckling-restrained braced frames", *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 2950-2958.

Sahoo, D y D Rai (2010), "Seismic strengthening of non-ductile reinforced concrete frames using aluminum shear links as energy-dissipation devices", *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 3548-3557.

Shih, M H y W P Sung (2005), "A model for hysteretic behavior of rhombic low yield strength steel added damping and stiffness", *Computers and Structures*, Vol. 83, pp. 895-908.

Tehranizadeh, M (2001), "Passive energy dissipation device for typical steel frame building in Iran", *Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 643-655.

Tena-Colunga, A, E Del Valle y D Pérez-Moreno (1996), "Issues on the seismic retrofit of a building near resonant response and structural pounding", *Earthquake Spectra*, Vol. 12, No. 3, pp. 567-597.

Tena-Colunga, A. (1997), "Mathematical modelling of the ADAS energy dissipation device", *Engineering Structures*, Vol. 19, pp. 811-821.

Tena-Colunga, A, y A Vergara (1997), "Comparative study on the seismic retrofit of a mid-rise steel building: steel bracing vs energy dissipation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp. 637-655.

Tena, A. (2000), "Modelado analítico de edificios con disipadores de energía", *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 62, pp. 29-62.

Tena, A (2003), "Disipación pasiva de energía en México: un estado del arte", *Memorias, VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Barquisimeto, Venezuela, noviembre.

Tena, A y C Cheja (2005), "Comportamiento sísmico de edificios esbeltos con base en marcos dúctiles de acero estructural diseñados conforme al Reglamento de la ciudad de México", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-20.

Tena A. (2007), *Análisis de estructuras con métodos matriciales*, primera edición, Limusa, septiembre. ISBN: 978-968-18-6980-9

Tena-Colunga, A, E A Godínez-Domínguez y L E Pérez-Rocha (2007), "Vulnerability maps for reinforced concrete structures for Mexico City's Metropolitan Area under a design earthquake scenario", *Earthquake Spectra*, Vol. 23, No. 4, pp. 809-840.

- Tena-Colunga, A, H Correa-Arizmendi, J L Luna-Arroyo y G Gatica-Avilés (2008), “Seismic behavior of code-designed medium rise special moment-resisting frame RC buildings in soft soils of Mexico City”, *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 3681-3707.
- Tena, A y H Correa (2008), “Evaluación de los criterios de diseño por sismo del RCDF para marcos dúctiles de concreto reforzado”, *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 78, pp. 73-101, enero-junio, <https://doi.org/10.18867/ris.78.24>.
- Tena, A (2011), *Notas de la clase Sistemas de control de la respuesta sísmica*, Posgrado en Ingeniería Estructural, UAM-Azcapotzalco, Trimestre 11-I, México, D.F.
- Tena, A y H J Nangullasmú (2013), “Diseño sísmico de marcos no dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía histeréticos. Definición de parámetros de diseño”, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 13, No. 2, pp. 275-299.
- Tena, A, K L Chinchilla y G Juárez (2013), “Evaluación de la flexibilidad elástica de sistemas de piso utilizados en edificios urbanos”, *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 89, pp. 135-166, <https://doi.org/10.18867/ris.89.167>.
- Tena, A, y J A Cortés (2014), “Impacto de la redundancia estructural en el comportamiento sísmico de marcos dúctiles de concreto reforzado”, *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-34.
- Tena-Colunga, A y H J Nangullasmú-Hernández (2015), “Assessment of seismic design parameters of moment resisting RC braced frames with metallic fuses”, *Engineering Structures*, Vol. 95, pp. 138-153.
- Tena-Colunga, A, K L Chinchilla-Portillo y G Juárez-Luna (2015), “Assessment of the diaphragm condition for floor systems used in urban buildings”, *Engineering Structures*, Vol. 93, pp. 70-84, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.025>.
- Tena, A, J A Cortés, E A Godínez (2016), “Impacto de la redundancia estructural en el comportamiento sísmico de estructuras de concreto reforzado”, *Alternativas*, Vol. 17, No. 3, pp. 180-197.
- Tena, A y A Gama (2017), “Determinación de parámetros de diseño sísmico para marcos dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía histeréticos”, *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, Vol. 14, No. 1, pp. 36-58.
- Tena-Colunga, A y H Hernández-Ramírez (2017), “Code-oriented global design parameters for moment-resisting steel frames with metallic structural fuses”, *Frontiers in Built Environment*, Vol. 3, Article 19, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00019>.
- Tena, A y H Hernández (2017), “Diseño sísmico resiliente de marcos dúctiles de acero con fusibles estructurales”, *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 22, No. 4, pp. 421-457.

Tena, A (2018), “Algunos aspectos a considerar en el modelado de estructuras para el análisis y diseño por sismo”, *Memorias, Conferencia Magistral, XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Campeche, México, noviembre.

TGC (2010), “Estudio de la mecánica de suelos para la remodelación del edificio de Ferronales en Mosqueta Aldama, Col. Buenavista, México D.F”, *TGC Ingeniería*.

Tremblay, R, L Poncet, P Bolduc, R Neville y R DeVall (2004), “Testing and design of buckling restrained braces for canadian application”, *Proceedings, Thirteen World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada.

Tremblay, R, L Chen, y L Tirca (2014), “Enhancing the Seismic Performance of Multi-storey Buildings with a Modular Tied Braced Frame System with Added Energy Dissipating Devices”, *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 3, No. 1, pp. 21–33.

Tsai K-C, H-W Chen, C-P Hong y Y-F Su (1993). Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic resistant construction. *Earthquake Spectra*, Vol. 9, No. 3, pp. 505-528.

Vargas, E, Gómez C y A Tena (1994), “Reestructuración sísmica de un edificio en la ciudad de México con sistemas disipadores de energía ADAS”, *Memorias, 9th International Seminar on Earthquake Prognostics*, San José, Costa Rica, septiembre

Vargas, R E y M Bruneau (2006a), “Analytical investigation of the structural fuse concept”, *Rep. No. MCEER-06-004*, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y

Vargas, R E y M Bruneau (2006b), “Experimental investigation of the structural fuse concept”, *Rep. No. MCEER-06-005*, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y

Vargas, R y M Bruneau (2009), “Analytical response and design of buildings with metallic structural fuses. I”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No. 4, pp. 386–393.

Vera, R, P Girault, J A Alonso, M A García y S A Miranda (2006), “Placas disipadoras de energía con empotramiento por simetría (PDES)”, *Memorias, XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Puerto Vallarta, Jalisco, CDROM, pp. 2-13, noviembre.

Wallace, J y J P Moehle (1989), “BIAX: A computer program for the analysis reinforced concrete sections”, *Report No. UCB/SEMM-89/12*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.

Watanabe, A, Y Hitomi, E Sacki, A Wada y M Fujimoto (1988), “Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube”, *Proceedings, Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. IV, 719-724.

Whittaker, A, V Bertero, C Thompson y J Alonso (1989). “Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements”. *Report UCB/EERC-89/02*. Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.

Wu, B, J P Ou y T T Soong (1997), “Optimal placement of energy dissipation devices for three-dimensional structures”, *Engineering Structures*, Vol. 19, No.2, pp. 113-125.

Xia, C, y R Hanson (1992), “Influence of ADAS Element Parameters on Building Seismic Response”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 7, pp. 1903–1918.

Yang, TY, DP Tung y Y Li (2018), “Equivalent energy design procedure for earthquake resilient fused structures”, *Earthquake Spectra*, Vol. 34, No. 2, pp. 1-21.

Zahrai, SM y A Moslehi Tabar (2013), “Analytical study on cyclic behavior of chevron braced frames with shear panel system considering post-yield deformation”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 40, pp. 633–643.

11. Apéndice A. Diseño de vigas secundarias

Datos Iniciales:

Concreto clase I, $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$, $E_c = 1400\sqrt{f'_c} = 221\,360 \text{ kg/cm}^2$

Acero de refuerzo, $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, $E_s = 2\,038\,900 \text{ kg/cm}^2$

Carga Viva, $CV_{\text{oficina}} = 250 \text{ kg/m}^2$, $CV_{\text{azotea}} = 100 \text{ kg/m}^2$

Carga Muerta, $CM_{\text{oficina}} = 470 \text{ kg/m}^2$, $CM_{\text{azotea}} = 350 \text{ kg/m}^2$

Peralte de losa, $t_{\text{losa}} = 10 \text{ cm}$

Longitud en x, $L_{VSx} = 800 \text{ cm}$

Longitud en y, $L_{VSy} = 700 \text{ cm}$

Elementos mecánicos:

Combinación: PP + CM + CV_{media}

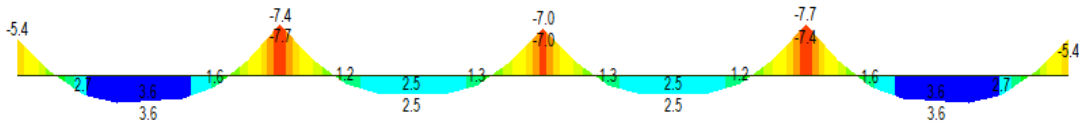


Figura A.1. Momento flexionante para entrespezo dirección x (unidades: t-m)

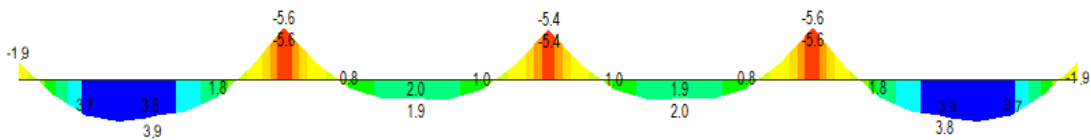


Figura A.2. Momento flexionante para azotea dirección x (unidades: t-m)

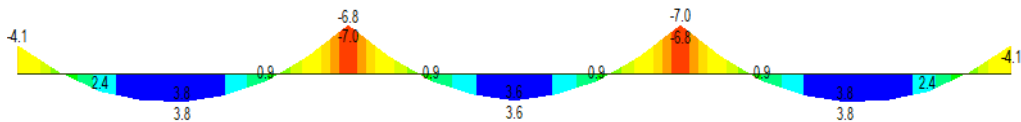


Figura A.3. Momento flexionante para entrespezo dirección y (unidades: t-m)

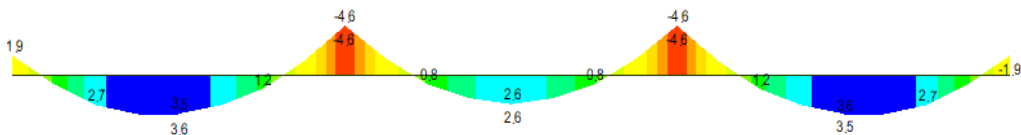
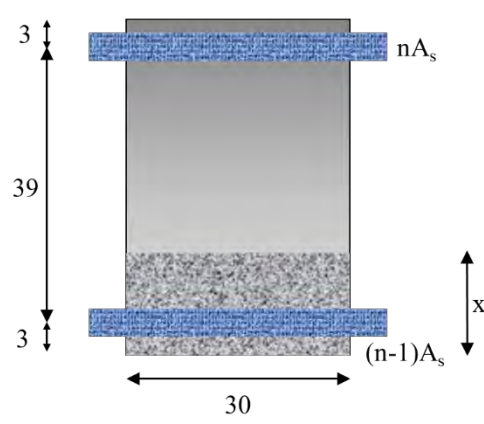


Figura A.4. Momento flexionante para azotea dirección y (unidades: t-m)

Cálculo de momentos de inercia dirección x:

a) Sección en los apoyos



$$n = \frac{E_s}{E_c} = 9.21$$

$$nA_s = (9.21)(5 * 1.98) = 91.18 \text{ cm}^2$$

$$(n - 1)A'_s = (9.21 - 1)(3 * 1.98) = 48.77 \text{ cm}^2$$

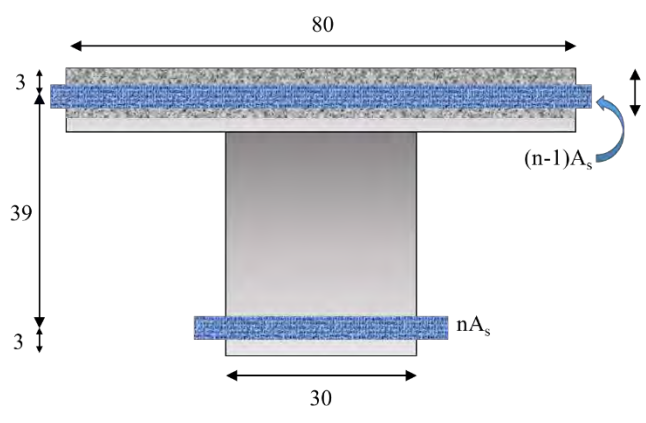
$$30 \left(\frac{x^2}{2} \right) + 48.77(x - 3) = 91.18(42 - x)$$

$$x = 12.27 \text{ cm}$$

$$I = \frac{(30 * 3^3)}{3} + 48.77(12.27 - 3)^2 + 91.18(42 - 12.27)^2$$

$$I = 85,052 \text{ cm}^4$$

b) Sección al centro del claro



$$b = \begin{cases} 8t = 8 * 10 = 80 \\ \frac{L}{8} - \frac{b'}{2} = 100 - 15 = 85 \\ \frac{L_2 - b'}{2} = \frac{400 - 30}{2} = 185 \end{cases}$$

$$b = 80 \text{ cm}$$

$$nA_s = (9.21)(3 * 1.98) = 54.71 \text{ cm}^2$$

$$(n - 1)A'_s = (9.21 - 1)(2 * 1.27) = 32.51 \text{ cm}^2$$

$$80 \left(\frac{x^2}{2} \right) + 32.51(x - 3) = 54.71(42 - x)$$

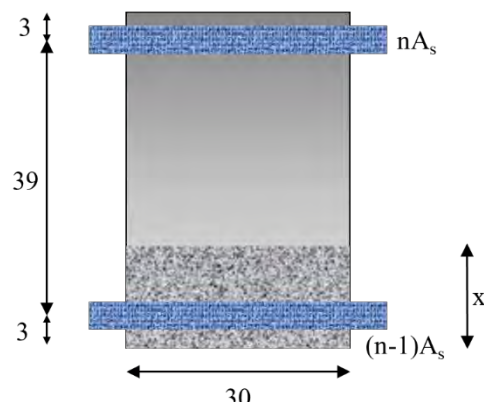
$$x = 6.72 \text{ cm}$$

$$I = \frac{(80 * 10^3)}{3} + 32.51(6.72 - 3)^2 + 54.71(42 - 6.72)^2$$

$$I = 95,213 \text{ cm}^4$$

Cálculo de momentos de inercia dirección y:

a) Sección en los apoyos



$$n = \frac{E_s}{E_c} = 9.21$$

$$nA_s = (9.21)(4 * 1.98) = 72.94 \text{ cm}^2$$

$$(n - 1)A'_s = (9.21 - 1)(3 * 1.98) = 48.77 \text{ cm}^2$$

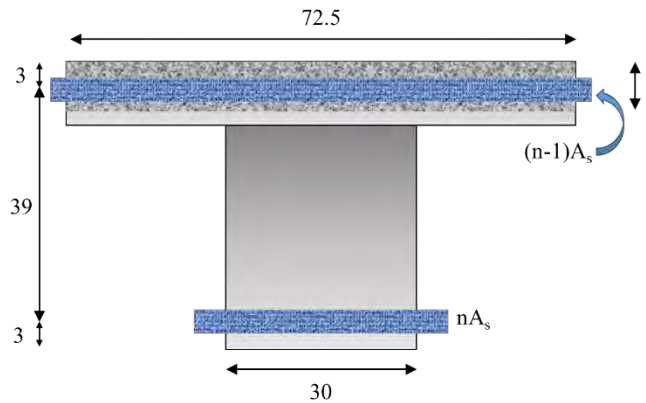
$$30 \left(\frac{x^2}{2} \right) + 48.77(x - 3) = 72.94(42 - x)$$

$$x = 11.12 \text{ cm}$$

$$I = \frac{(30 * 3^3)}{3} + 48.77(11.12 - 3)^2 + 72.94(42 - 11.12)^2$$

$$I = 73,039 \text{ cm}^4$$

b) Sección en el centro del claro



$$8t = 8 * 10 = 80$$

$$\frac{L}{8} - \frac{b'}{2} = 100 - 15 = 72.5$$

$$\frac{L_2 - b'}{2} = \frac{350 - 30}{2} = 160$$

$$b = 72.5 \text{ cm}$$

$$nA_s = (9.21)(3 * 1.98) = 54.71 \text{ cm}^2$$

$$(n - 1)A'_s = (9.21 - 1)(2 * 1.27) = 32.51 \text{ cm}^2$$

$$72.5 \left(\frac{x^2}{2} \right) + 32.51(x - 3) = 54.71(42 - x)$$

$$x = 7.01 \text{ cm}$$

$$I = \frac{(72.5 * 10^3)}{3} + 32.51(7.01 - 3)^2 + 54.71(42 - 7.01)^2$$

$$I = 91,671 \text{ cm}^4$$

Deflexiones inmediatas en vigas secundarias en x:

$$I_e = \frac{2 * 85,052 + 2 * 95,213}{4} = 90,087.5 \text{ cm}^4$$

$$a_{inmediata} = \frac{5L^2}{48EI} \left[M_c - \frac{1}{10}(M_i + M_d) \right] =$$

$$a_{inmediata} = \frac{5(800)^2}{48(221,360)(90,087.5)} \left[3.9 - \frac{1}{10}(5.6 + 1.9) \right] * 10^5 = 1.05 \text{ cm}$$

Deflexiones a largo plazo en dirección x:

a) Cuantía en apoyo

$$(\rho')_{apoyo} = \frac{3 * 1.98}{42 * 30} = .0047$$

b) Cuantía en el centro

$$(\rho')_{apoyo} = \frac{2 * 1.98}{42 * 30} = .0031$$

c) Cuantía promedio

$$(\rho')_{promedio} = \frac{2 * (0.0047 + 0.0031)}{4} = .0039$$

d) Deflexión a largo plazo (ec. 3.4 NTCC-04)

$$a_{lp} = a_{inmediata} \left(\frac{2}{1 + 50\rho'_{promedio}} \right) = 1.05 \left(\frac{2}{1 + 50 * .0039} \right) = 1.75 \text{ cm}$$

e) Deflexión total

$$a_{total} = a_{inmediata} + a_{lp} = 1.05 + 1.75 = 2.80 \text{ cm}$$

f) Deflexión admisible (sección 4.1.a NTCE-04)

$$a_{admisible} = 0.5 + \frac{L}{240} = 0.5 + \frac{800}{240} = 3.83 \text{ cm} > a_{total}$$

Deflexiones inmediatas en vigas secundarias en y:

$$I_e = \frac{2 * 73,039 + 2 * 91,671}{4} = 82,355 \text{ cm}^4$$

$$a_{inmediata} = \frac{5L^2}{48EI} \left[M_c - \frac{1}{10}(M_i + M_d) \right] =$$

$$a_{inmediata} = \frac{5(700)^2}{48(221,360)(82,355)} \left[3.6 - \frac{1}{10}(1.9 + 4.6) \right] * 10^5 = 0.83 \text{ cm}$$

Deflexiones a largo plazo en dirección y:

g) Cuantía en apoyo

$$(\rho')_{apoyo} = \frac{3 * 1.98}{42 * 30} = .0047$$

h) Cuantía en el centro

$$(\rho')_{apoyo} = \frac{2 * 1.98}{42 * 30} = .0031$$

i) Cuantía promedio

$$(\rho')_{promedio} = \frac{2 * (0.0047 + 0.0031)}{4} = .0039$$

j) Deflexión a largo plazo (ec. 3.4 NTCC-04)

$$a_{lp} = a_{inmediata} \left(\frac{2}{1 + 50\rho'_{promedio}} \right) = 0.83 \left(\frac{2}{1 + 50 * .0039} \right) = 1.39 \text{ cm}$$

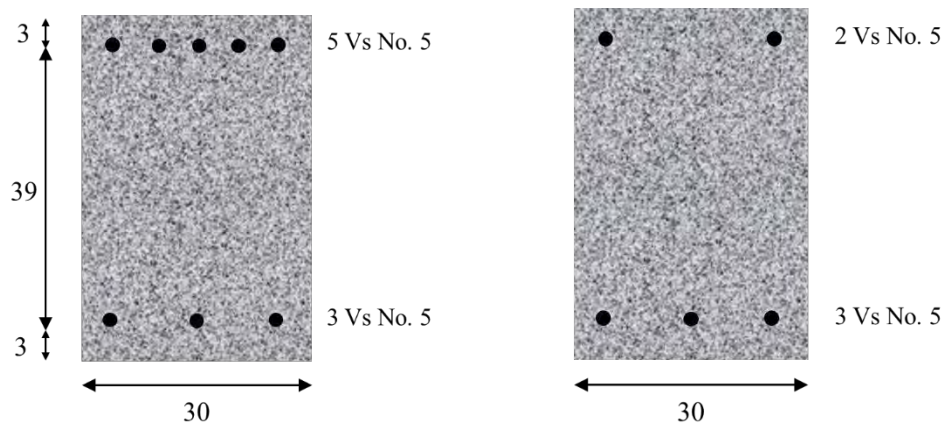
k) Deflexión total

$$a_{total} = a_{inmediata} + a_{lp} = 0.83 + 1.39 = 2.22 \text{ cm}$$

l) Deflexión admisible (sección 4.1.a NTCE-04)

$$a_{admisible} = 0.5 + \frac{L}{240} = 0.5 + \frac{700}{240} = 3.41 \text{ cm} > a_{total}$$

Sección en dirección x:

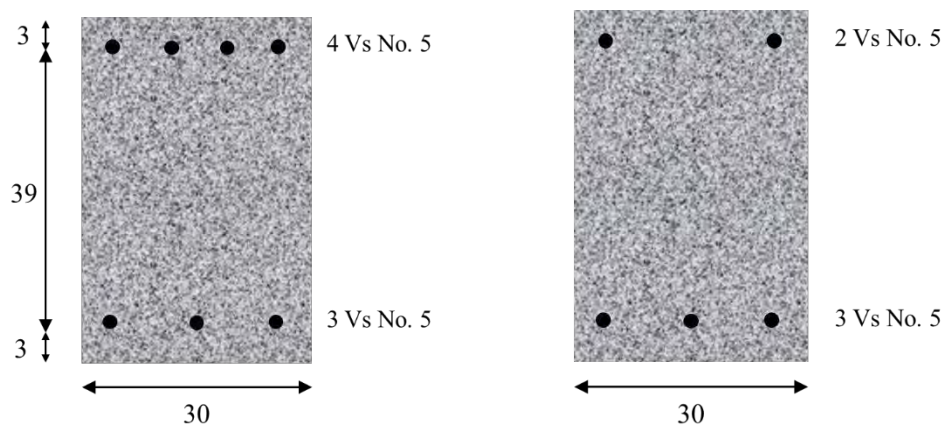


a) Zona de apoyos

b) Centro del claro

Figura A.5. Vigas secundarias en la dirección x

Sección en dirección y:



a) Zona de apoyos

b) Centro del claro

Figura A.6. Vigas secundarias en la dirección y

12. Apéndice B. Diseño de losa maciza de concreto

Datos Iniciales:

Concreto clase I, $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$, $f'_c = 170 \text{ kg/cm}^2$, $E_c = 1400\sqrt{f'_c} = 221\,360 \text{ kg/cm}^2$

Acero de refuerzo, $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, $E_s = 2\,038\,900 \text{ kg/cm}^2$

Carga Viva, $CV_{\text{oficina}} = 250 \text{ kg/m}^2$, $CV_{\text{azotea}} = 100 \text{ kg/m}^2$

Carga Muerta, $CM_{\text{oficina}} = 470 \text{ kg/m}^2$, $CM_{\text{azotea}} = 350 \text{ kg/m}^2$

Peralte de losa, $t_{\text{losa}} = 10 \text{ cm}$, colado monolítico

Viga secundaria, 30x45 cm

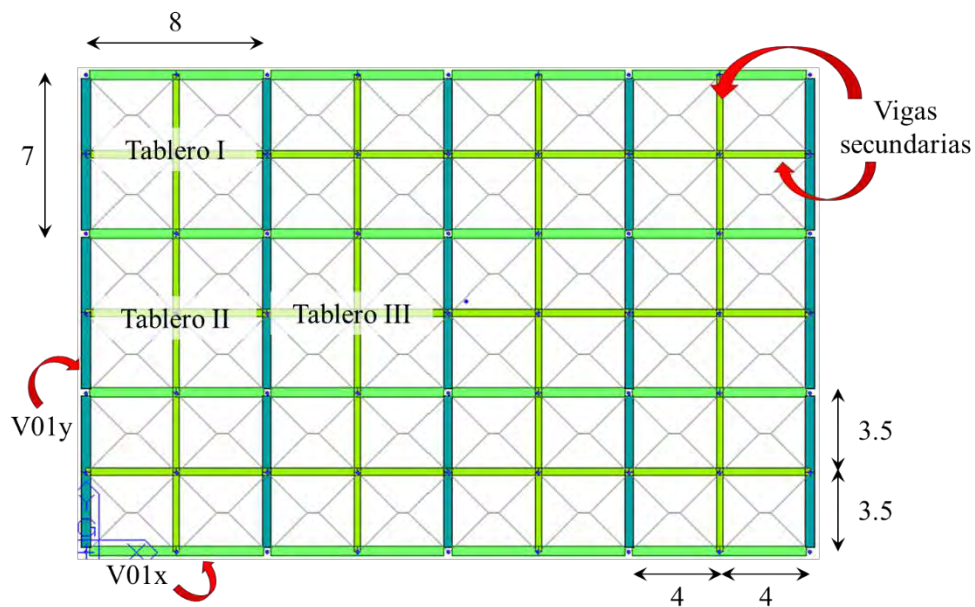


Figura B.1. Configuración en planta de entepiso (unidades: m)

Cálculo del peralte mínimo:

Para el tablero I que es el más desfavorable,

$$\text{Perímetro} = 400 + 350 + 1.25(400 + 350) = 1,687.5 \text{ cm}$$

$$f_s = 0.6 \times 4200 = 2520 \text{ kg/cm}^2$$

$$w_{\text{total}} = 250 + 470 = 720 \text{ kg/m}^2$$

Factor de corrección del perímetro (ec. 6.7 NTCC-04),

$$FCP = 0.032\sqrt[4]{2520 \times 720} = 1.17$$

Peralte mínimo (sección 6.3.3.5 NTCC-04),

$$t_{\min} = \frac{FCP \times \text{Perímetro}}{250} + 2 = \frac{1.17 \times 1,687.5}{250} + 2 = 9.93 \text{ cm} \approx 10 \text{ cm}$$

Elementos mecánicos para diseño:

Combinación: $1.4(PP + CM + CV_{\text{máxima}}) = 1,008 \text{ kg/m}^2$

$$\rho_{\min} = 0.002$$

Separación = 50 cm ó $2.5t = 25 \text{ cms}$ (sección 6.3.3.4 NTCC-04)

$$F_R b d^2 f'_c = 0.9 * 100 * 8^2 * 170 = 9.8 \times 10^5 \text{ (acero positivo)}$$

$$F_R b d^2 f'_c = 0.9 * 100 * 6^2 * 170 = 5.5 \times 10^5 \text{ (acero negativo)}$$

$$m = \frac{a_1}{a_2} = \frac{350}{400} = 0.875$$

Tabla B.1. Distribución de acero para tablero de esquina

	Factor (α) Tabla 6.1 NTCC-04	M_u (kg-m) $\alpha 10^{-4} w_u a_1^2$	Q $M_u / F_R b d^2 f'_c$	q $1 - \sqrt{1 - 2Q}$	$\rho = q f'_c / f_y$	$A_s = \rho b d$ (cm ² /m)	Varilla No.	S_{req} (cm)
Dirección corta								
- continuo	383	472.9	0.086	0.090	0.0036	2.18	3	25
positivo	186	229.7	0.023	0.024	0.0010	1.60	3	25
- discontinuo	226.75	280.0	0.051	0.052	0.0021	1.27	3	25
Dirección larga								
- continuo	368.5	455.0	0.083	0.086	0.0035	2.10	3	25
positivo	138.5	171.0	0.017	0.018	0.0007	1.60	3	25
- discontinuo	210	259.3	0.047	0.048	0.0020	1.20	3	25

Tabla B.2. Distribución de acero para tablero de borde corto discontinuo

	Factor (α) Tabla 6.1 NTCC-04	M_u (kg-m) $\alpha 10^{-4} w_u a_1^2$	Q $M_u / F_R b d^2 f'_c$	q $1 - \sqrt{1 - 2Q}$	$\rho = q f'_c / f_y$	$A_s = \rho b d$ (cm ² /m)	Varilla No.	S_{req} (cm)
Dirección corta								
- continuo	368.5	455.0	0.083	0.086	0.0035	2.10	3	25
positivo	175.75	217.0	0.022	0.022	0.0009	1.60	3	25
- discontinuo	368.5	455.0	0.083	0.086	0.0035	2.10	3	25
Dirección larga								
- continuo	332	410.0	0.074	0.077	0.0031	1.88	3	25
positivo	129.5	159.9	0.016	0.016	0.0007	1.60	3	25
- discontinuo	210	259.3	0.047	0.048	0.0020	1.20	3	25

Revisión a cortante (sección 6.3.3.6 NTCC-04):

$$V_u = 1.15 \left(\frac{a_1}{2} - d \right) \left(0.95 - 0.5 \frac{a_1}{a_2} \right) w = 1.15 \left(\frac{3.5}{2} - 0.08 \right) \left(0.95 - 0.5 \frac{3.5}{4} \right) 1,008 = 992 \text{ kg}$$

$$V_c = 0.5 F_R b d \sqrt{f'_c} = 0.5 * 0.8 * 100 * 8 * \sqrt{200} = 4,525 \text{ kg} > V_u$$

13. Apéndice C. Diseño de muros de concreto reforzado (sótanos)

1. Design Condition

Design Code : ACI318-11
 Unit System : tonf, m
 Wall ID : 5 (Wall Mark : WM0005)
 Story : IDSE01 (Height = 4 m)
 Material Data : $f_c = 2500$, $f_y = 42184.2$, $f_{ys} = 42184.2$ tonf/m²
 Wall Dim. (Length*Thk) : 32*0.12 m
 Vertical Rebar : #4 @300 (AsV = 0.00086 m²/m)



2. Applied Loads

Load Combination : 24
 $P_u = 1152.07$ tonf
 $M_{cy} = 737.971$, $M_{cz} = 0.00000$ tonf-m

3. Axial Forces and Moments Capacity Check

Concentric Max. Axial Load $\Phi P_{n-max} = 4823.77$ tonf

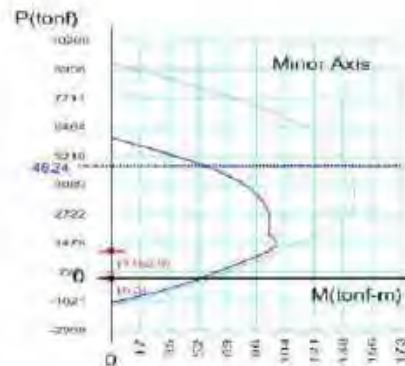
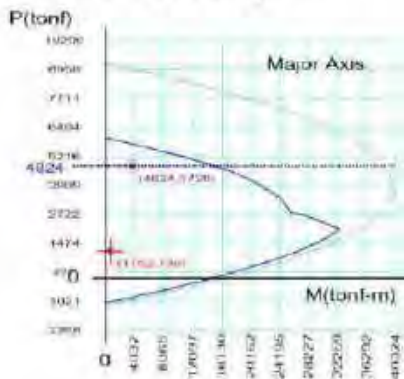
Major Axis

Design Axial Load Strength $\Phi P_{ny} = 4823.77$ tonf
 Axial Ratio $P_u/\Phi P_{ny} = 0.239 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength $\Phi M_{ny} = 3729.35$ tonf-m
 Moment Ratio $M_{cy}/\Phi M_{ny} = 0.198 < 1.000$ O.K.

Minor Axis

Design Axial Load Strength $\Phi P_{nz} =$
 Axial Ratio $P_u/\Phi P_{nz} = 0.000 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength $\Phi M_{nz} =$
 Moment Ratio $M_{cz}/\Phi M_{nz} = 0.000 < 1.000$ O.K.

4. P-M Interaction Diagram



5. Shear Force Capacity Check

Applied Shear Strength $V_u = 216.776$ tonf (Load Combination : 3)
 Design Shear Strength $\Phi V_c + \Phi V_s = 422.646 + 328.453 = 751.099$ tonf
 (As-H_{req} = 0.00041 m²/m, #3 @350)
 Shear Ratio $V_u/\Phi V_n = 0.289 < 1.000$ O.K.

Figura C.1. Diseño de muros de sótano en dirección x, modelo de 8 niveles

1. Design Condition

Design Code ACI318-11
 Unit System tonf, m
 Wall ID 8 (Wall Mark - wM0008)
 Story IDSE01 (Height = 4 m)
 Material Data $f_c = 2500$, $f_y = 42184.2$, $f_{ys} = 42184.2$ tonf/m²
 Wall Dim (Length*Thk) 21*0.12 m
 Vertical Rebar #4 @300 ($A_sV = 0.00086$ m²/m)



2. Applied Loads

Load Combination 1
 $P_u = 910.430$ tonf
 $M_{cy} = 0.00001$, $M_{cz} = 0.00000$ tonf-m

3. Axial Forces and Moments Capacity Check

Concentric Max. Axial Load $\Phi P_n\text{-max.} = 3160.90$ tonf

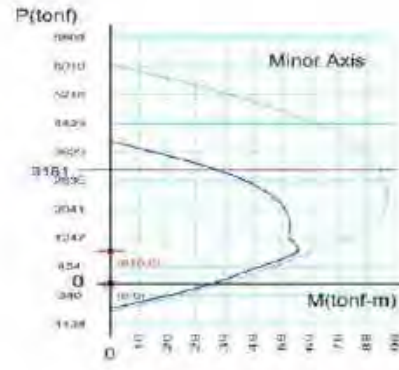
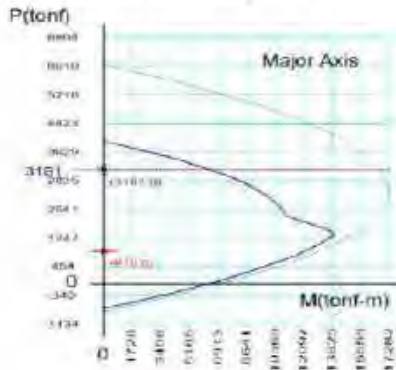
Major Axis

Design Axial Load Strength $\Phi P_n = 3160.90$ tonf
 Axial Ratio $P_u/\Phi P_n = 0.288 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength ΦM_n
 Moment Ratio $M_{cy}/\Phi M_n = 0.000 < 1.000$ O.K.

Minor Axis

Design Axial Load Strength ΦP_n
 Axial Ratio $P_u/\Phi P_n = 0.000 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength ΦM_n
 Moment Ratio $M_{cz}/\Phi M_n = 0.000 < 1.000$ O.K.

4. P-M Interaction Diagram



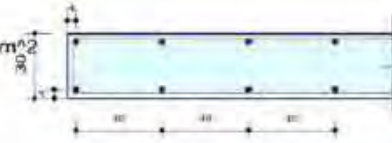
5. Shear Force Capacity Check

Applied Shear Strength $V_u = 199.117$ tonf (Load Combination 23)
 Design Shear Strength $\Phi V_c + \Phi V_s = 237.713 + 269.434 = 507.147$ tonf
 (As-H_{req} = 0.00041 m²/m, #3 @350)
 Shear Ratio $V_u/\Phi V_n = 0.393 < 1.000$ O.K.

Figura C.2. Diseño de muros de sótano en dirección y, modelo de 8 niveles

1. Design Condition

Design Code : ACI318-11
 Unit System : tonf, cm
 Wall ID : 9 (Wall Mark : wM0009)
 Story : IDSE_03 (Height = 400 cm)
 Material Data : $f_c = 0.25$, $f_y = 4.21842$, $f_{ys} = 4.21842$ tonf/cm²
 Wall Dim. (Length*Thk) : 3200*30 cm
 Vertical Rebar : #5 @400 ($A_s/V = 9.99998$ cm²/m)



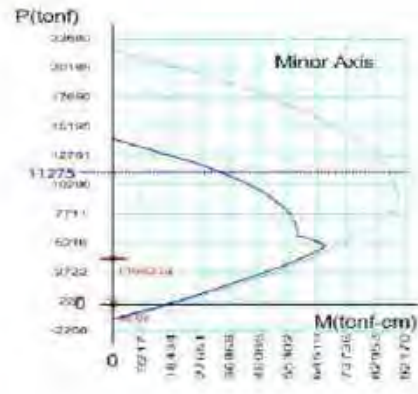
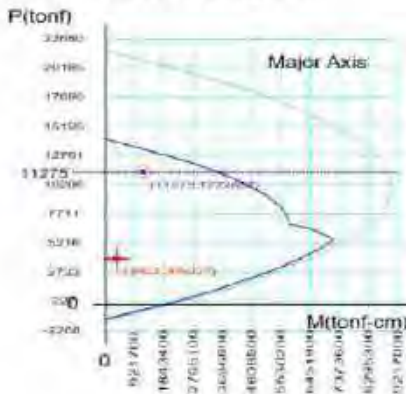
2. Applied Loads

Load Combination : 24
 $P_u = 3901.56$ tonf
 $M_{cy} = 385037$ tonf-cm $M_{cz} = 0.00000$ tonf-cm

3. Axial Forces and Moments Capacity Check

Concentric Max. Axial Load $\Phi P_n\text{-max} = 11274.6$ tonf
Major Axis
 Design Axial Load Strength $\Phi P_{ny} = 11274.6$ tonf
 Axial Ratio $P_u/\Phi P_{ny} = 0.346 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength $\Phi M_{ny} = 1222657$ tonf-cm
 Moment Ratio $M_{cy}/\Phi M_{ny} = 0.299 < 1.000$ O.K.
Minor Axis
 Design Axial Load Strength $\Phi P_{nz} =$
 Axial Ratio $P_u/\Phi P_{nz} = 0.000 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength $\Phi M_{nz} =$
 Moment Ratio $M_{cz}/\Phi M_{nz} = 0.000 < 1.000$ O.K.

4. P-M Interaction Diagram



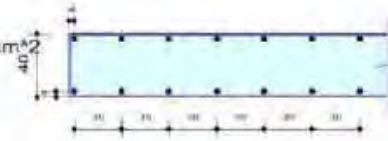
5. Shear Force Capacity Check

Applied Shear Strength $V_u = 566.189$ tonf (Load Combination : 29)
 Design Shear Strength $\Phi V_c + \Phi V_s = 1021.76 + 597.187 = 1618.95$ tonf
 ($A_s/H_{req} = 7.37326$ cm²/m, #4 @350)
 Shear Ratio $V_u/\Phi V_n = 0.350 < 1.000$ O.K.

Figura C.3. Diseño de muros de sótano en dirección x, modelo de 15 niveles

1. Design Condition

Design Code : ACI318-11
 Unit System : tonf, cm
 Wall ID : 12 (Wall Mark : wMD012)
 Story : IDSE_03 (Height = 400 cm)
 Material Data : $f_c = 0.25$, $f_y = 4.21842$, $f_{ys} = 4.21842$ tonf/cm²
 Wall Dim. (Length*Thk) : 2100*40 cm
 Vertical Rebar : #5 @300 ($A_sV = 13.3333$ cm²/m)



2. Applied Loads

Load Combination : 23
 $P_u = 2410.72$ tonf
 $M_{cy} = 1227273$, $M_{cz} = 0.00000$ tonf-cm

3. Axial Forces and Moments Capacity Check

Concentric Max. Axial Load $\Phi P_{n-max} = 9865.26$ tonf

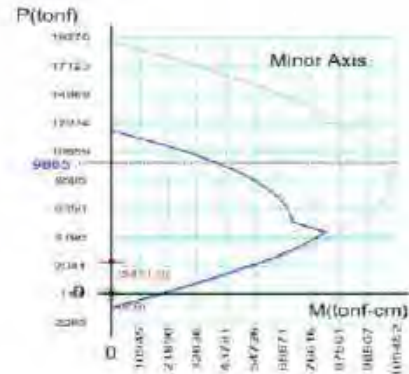
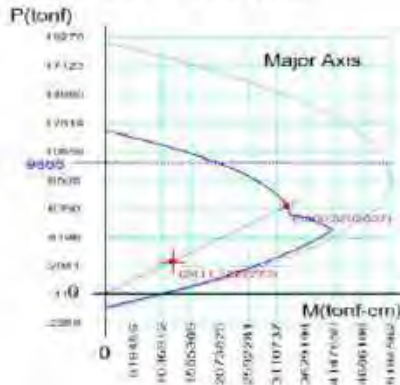
Major Axis

Design Axial Load Strength $\Phi P_{ny} = 6699.99$ tonf
 Axial Ratio $P_u/\Phi P_{ny} = 0.365 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength $\Phi M_{ny} = 3292037$ tonf-cm
 Moment Ratio $M_{cy}/\Phi M_{ny} = 0.373 < 1.000$ O.K.

Minor Axis

Design Axial Load Strength ΦP_{nz}
 Axial Ratio $P_u/\Phi P_{nz} = 0.000 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength ΦM_{nz}
 Moment Ratio $M_{cz}/\Phi M_{nz} = 0.000 < 1.000$ O.K.

4. P-M Interaction Diagram



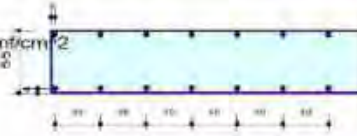
5. Shear Force Capacity Check

Applied Shear Strength $V_u = 634.424$ tonf (Load Combination : 33)
 Design Shear Strength $\Phi V_c + \Phi V_s = 792.375 + 685.832 = 1478.21$ tonf
 ($A_sH_{req} = 10.32256$ cm²/m, #4 @250)
 Shear Ratio $V_u/\Phi V_n = 0.429 < 1.000$ O.K.

Figura C.4. Diseño de muros de sótano en dirección y, modelo de 15 niveles

1. Design Condition

Design Code : ACI318-11
 Unit System : tonf, cm
 Wall ID : 9 (Wall Mark : WM0009)
 Story : IDSE03 (Height = 400 cm)
 Material Data : $f_c = 0.254929$, $f_y = 4.21842$, $f_{ys} = 4.21842$ tonf/cm²
 Wall Dim (Length*Thk) : 3200*55 cm
 Vertical Rebar : #6 @400 (AsV = 14.1936 cm²/m)



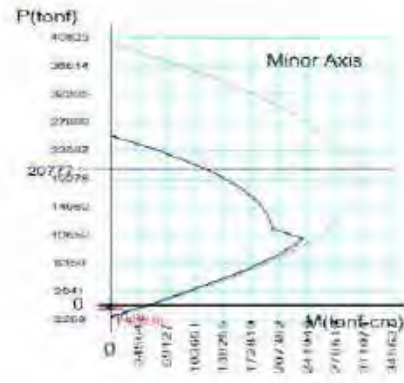
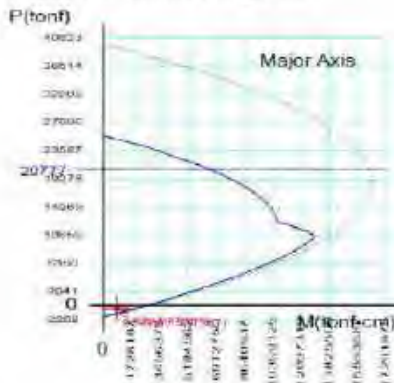
2. Applied Loads

Load Combination : 8
 $P_u = -498.62$ tonf
 $M_{cy} = 877097$, $M_{cz} = 0.00000$ tonf-cm

3. Axial Forces and Moments Capacity Check

Concentric Max. Axial Load $\Phi P_n\text{-max} = 20776.6$ tonf
 Major Axis
 Design Axial Load Strength $\Phi P_{ny} = -803.96$ tonf
 Axial Ratio $P_u/\Phi P_{ny} = 0.620 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength $\Phi M_{ny} = 1437367$ tonf-cm
 Moment Ratio $M_{cy}/\Phi M_{ny} = 0.610 < 1.000$ O.K.
 Minor Axis
 Design Axial Load Strength ΦP_{nz}
 Axial Ratio $P_u/\Phi P_{nz} = 0.000 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength ΦM_{nz}
 Moment Ratio $M_{cz}/\Phi M_{nz} = 0.000 < 1.000$ O.K.

4. P-M Interaction Diagram



5. Shear Force Capacity Check

Applied Shear Strength $V_u = 1701.78$ tonf (Load Combination : 19)
 Design Shear Strength $\Phi V_c + \Phi V_s = 1676.50 + 1619.87 = 3296.37$ tonf
 (As-H_{req} = 15.99997 cm²/m, #5 @250)
 Shear Ratio $V_u/\Phi V_n = 0.516 < 1.000$ O.K.

Figura C.5. Diseño de muros de sótano en dirección x, modelo de 24 niveles

1. Design Condition

Design Code : ACI318-11
 Unit System : tonf, cm
 Wall ID : 20 (Wall Mark : wM0020)
 Story : IDSE05 (Height = 400 cm)
 Material Data : $f_c = 0.254929$, $f_y = 4.21842$, $f_{ys} = 4.21842$ tonf/cm²
 Wall Dim. (Length*Thk) : 2100*65 cm
 Vertical Rebar : #6 @300 ($A_sV = 18.9247$ cm²/m)



2. Applied Loads

Load Combination : 19
 $P_u = 8339.63$ tonf
 $M_{cy} = 819595$, $M_{cz} = 0.00000$ tonf-cm

3. Axial Forces and Moments Capacity Check

Concentric Max. Axial Load : $\Phi P_{n-max} = 16207.6$ tonf

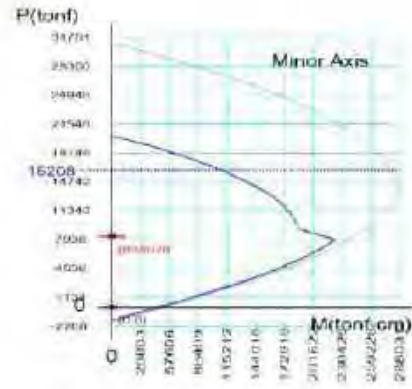
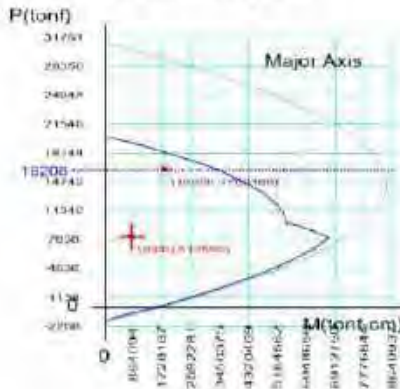
Major Axis

Design Axial Load Strength : $\Phi P_{ny} = 16207.6$ tonf
 Axial Ratio : $P_u/\Phi P_{ny} = 0.515 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength : $\Phi M_{ny} = 1789186$ tonf-cm
 Moment Ratio : $M_{cy}/\Phi M_{ny} = 0.458 < 1.000$ O.K.

Minor Axis

Design Axial Load Strength : ΦP_{nz}
 Axial Ratio : $P_u/\Phi P_{nz} = 0.000 < 1.000$ O.K.
 Design Moment Strength : ΦM_{nz}
 Moment Ratio : $M_{cz}/\Phi M_{nz} = 0.000 < 1.000$ O.K.

4. P-M Interaction Diagram



5. Shear Force Capacity Check

Applied Shear Strength : $V_u = 889.608$ tonf (Load Combination : 33)
 Design Shear Strength : $\Phi V_c + \Phi V_s = 11198.39 + 1063.04 = 2261.43$ tonf
 (As-H_{req} = 19.99996 cm²/m, #5 @200)
 Shear Ratio : $V_u/\Phi V_n = 0.393 < 1.000$ O.K.

Figura C.6. Diseño de muros de sótano en dirección y, modelo de 24 niveles

14. Apéndice D. Modelos de histéresis empleados en elementos de concreto reforzado y en contravientos metálicos

En esta sección se especifican los parámetros de histéresis empleados para el modelado de los elementos sismorresistentes del marco y de los contravientos metálicos. Para definir el comportamiento cíclico inelástico de vigas y columnas, se empleó el modelo de Takeda modificado; en el cuál se considera la degradación de rigidez que un elemento de concreto reforzado puede sufrir ante carga cíclica. Los puntos de respuesta con la carga inicial se encuentran dentro de la curva trilineal, y se pueden presentar los siguientes casos acorde a la librería de MIDAS Gen (2017):

1. El desplazamiento D sobrepasa el desplazamiento de la primera fluencia D_1 por primera vez o el punto de máxima deformación,
 - a) El punto se mueve a lo largo de la curva trilineal
 - b) Si la descarga ocurre desde la línea recta hacia la dirección opuesta, el punto se mueve hacia el primer punto de fluencia del lado opuesto
 - c) Si el máximo desplazamiento en el lado opuesto está en la zona elástica, la región de la zona elástica se extiende al primer punto de fluencia del lado opuesto
 - d) Si el máximo desplazamiento en el lado opuesto excede D_1 , el desplazamiento en la zona elástica está definido hasta el punto donde la fuerza restauradora se convierte en cero. Si sobrepasa más allá del punto cero, se mueve hacia el punto del máximo desplazamiento en el lado opuesto. La rigidez en la descarga desde la línea recta se dirige hacia este desplazamiento máximo y utiliza la rigidez de descarga desde el punto de máximo desplazamiento en el lado opuesto.
2. El desplazamiento D sobrepasa el desplazamiento de la segunda fluencia D_2 por primera vez o el punto de máximo desplazamiento,
 - a) El punto se mueve a lo largo de la curva trilineal
 - b) Si la descarga ocurre desde esta línea recta hacia la dirección opuesta, el punto se mueve desde el punto de descarga a lo largo de la línea recta de la rigidez obtenida con la siguiente ecuación:

$$K_{un2} = \left\{ \frac{P_2 + P_1}{D_2 + D_1} \right\} \cdot \left(\frac{D_{MAX}}{D_2} \right)^{-\beta} \quad (D.1)$$

donde,

K_{un2} : rigidez de descarga en el lazo exterior

P_1 : primera carga de fluencia en la zona opuesta del punto de descarga

P_2 : segunda carga de fluencia en la zona a la cual pertenece el punto de descarga

D_1 : primer desplazamiento de fluencia en la zona opuesta del punto de descarga

D_2 : segundo desplazamiento de fluencia a la cual pertenece el punto de descarga

D_{MAX} : máximo desplazamiento en la zona a la que pertenece el punto de descarga
 β : constante para determinar la rigidez de descarga del lazo exterior

- c) Si el punto de desplazamiento máximo en el lado opuesto no excede D_1 , el intervalo de la pendiente K_{un2} se extiende hasta P_1 en el lado opuesto (figura D.1). Si va más allá de P_1 , se dirige hacia el punto D_2 (figura D.2). Si la descarga se produce desde la línea recta dirigida hacia el punto D_2 , se mueve a lo largo de la línea recta de la pendiente K_b . Si la fuerza de restauración es mayor a cero, se dirige hacia el punto de máximo desplazamiento. Si la descarga se produce desde la línea recta dirigida hacia el punto de máximo desplazamiento, se mueve a lo largo de la pendiente K_{un2} . Si la fuerza de restauración excede de 0, se dirige hacia el punto máximo de desplazamiento en el lado opuesto (figura D.3).
- d) Si el signo de carga cambia en el proceso de descarga y mientras se realiza la recarga, la descarga puede ocurrir antes de alcanzar el punto objetivo en la curva trilineal. Los lazos se forman en el proceso, y todos se denominan lazos internos (figura D.4). La rigidez de descarga dentro de los lazos internos está definida por la siguiente ecuación:

$$K_{RI} = \gamma K_{un2} \quad (D.2)$$

donde,

K_{RI} : rigidez de descarga en el lazo interior

K_{un2} : rigidez de descarga en el lazo exterior en la zona a la que pertenece el punto inicial de la descarga

γ : factor de reducción para la rigidez de descarga del lazo interior

- e) Si el desplazamiento máximo en el lado opuesto excede a D_1 , el intervalo de la pendiente K_{un2} se extiende hasta el punto en que la fuerza de restauración se vuelve 0, y si va más allá de 0, se dirige hacia el punto de desplazamiento máximo. Si la descarga se realiza desde la línea recta dirigida hacia este punto máximo, D en este punto se convierte en el punto de máximo desplazamiento del lazo interno; y se mueve a lo largo de la pendiente K_{un2} , y se dirige hacia el punto de máximo desplazamiento si la fuerza de restauración excede el punto 0. Incluso en el caso de que la descarga tenga lugar desde la línea recta dirigida hacia este punto máximo, D se convierte en el punto máximo de desplazamiento del lazo interno y se mueve a lo largo de K_{un2} . Si la fuerza de restauración supera el punto 0, se dirige hacia el punto máximo de desplazamiento.

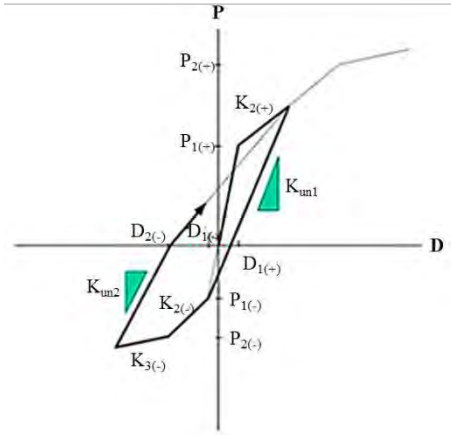


Figura D.1. Descarga antes de la fluencia en la zona sin agrietar (pequeñas deformaciones, MIDAS Gen 2017)

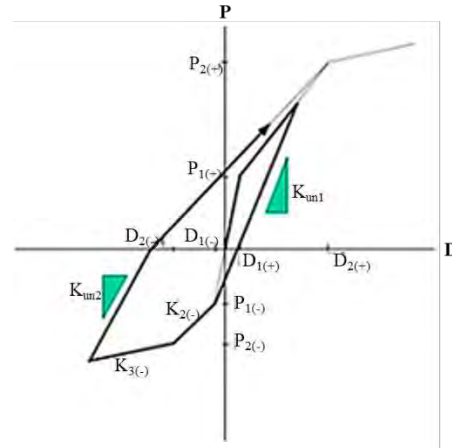


Figura D.3. Descarga antes de la fluencia en la zona sin agrietar (largas deformaciones, MIDAS Gen 2017)

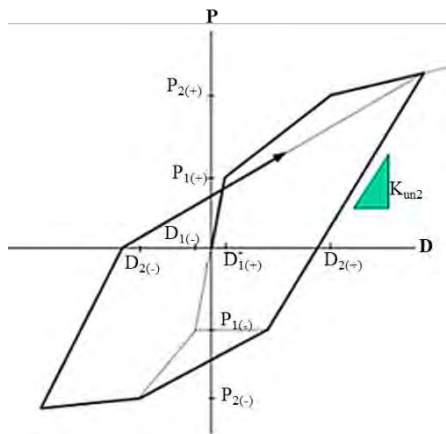


Figura D.2. Descarga después de la fluencia a la zona sin agrietar (MIDAS Gen 2017)

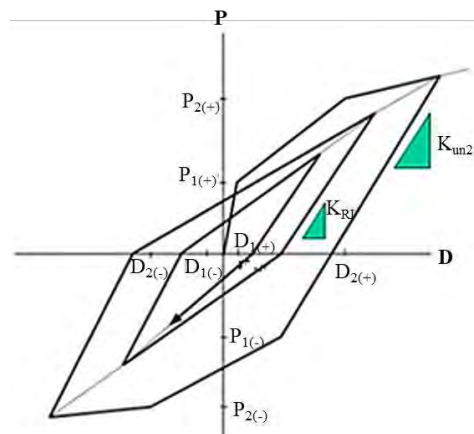


Figura D.4. Lazo interno para cargas cíclicas reversibles (MIDAS Gen 2017)

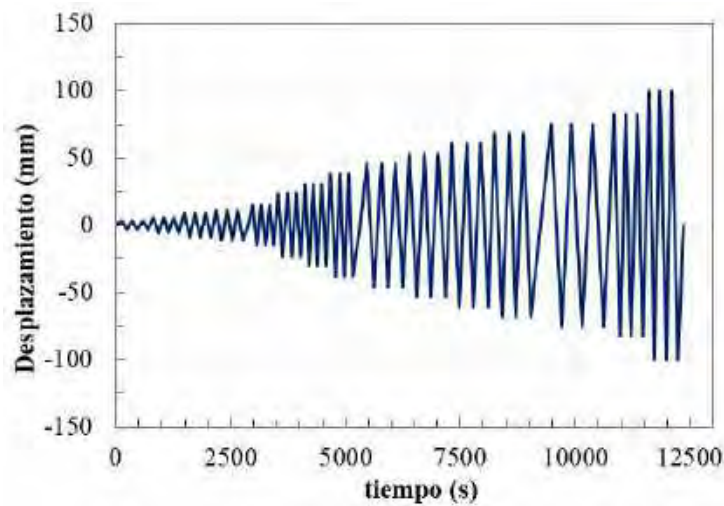


Figura D.5. Patrón de desplazamiento (Adaptado de Verderame et al. 2008)

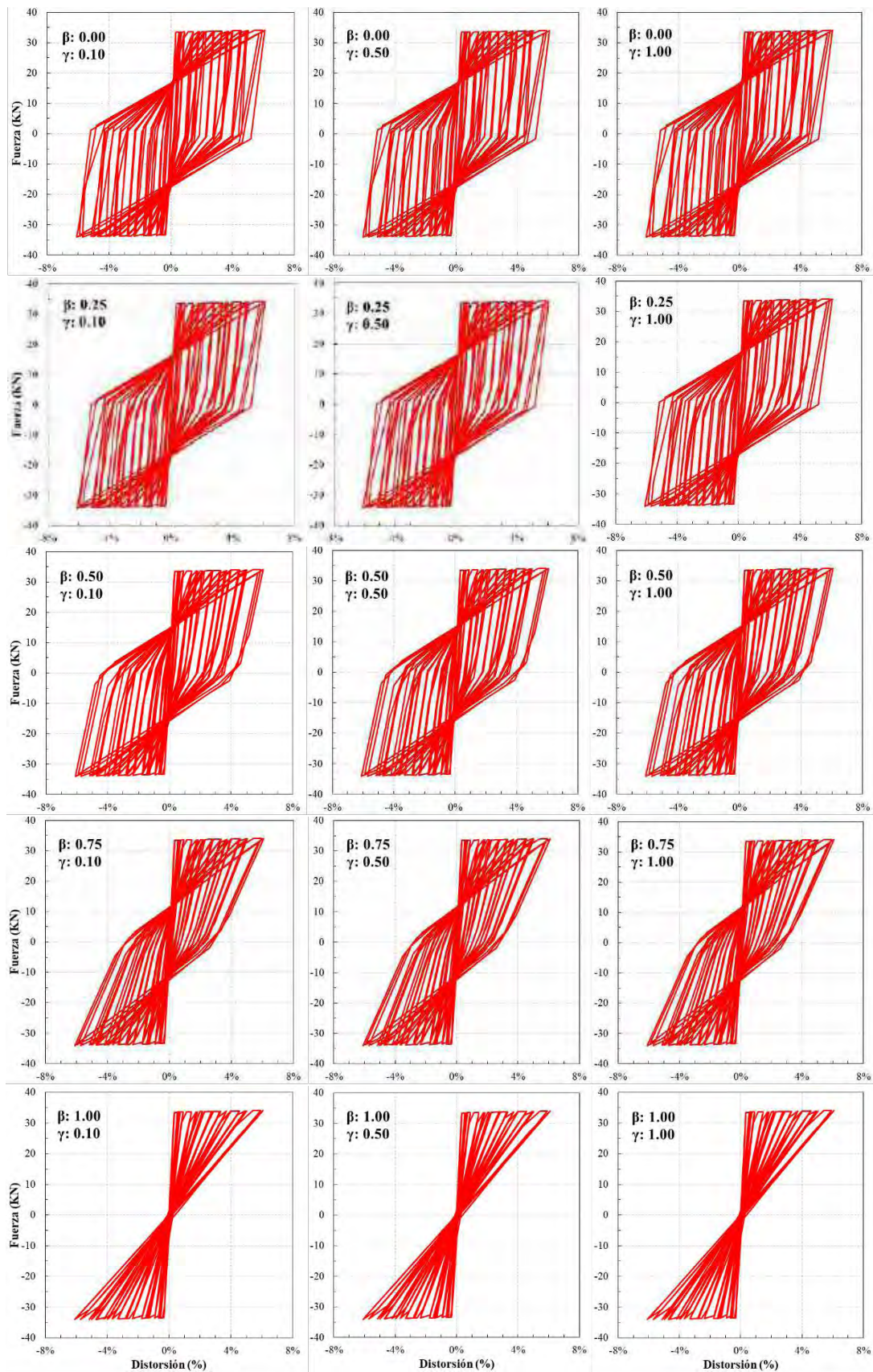


Figura D.6. Efecto de la variación de los parámetros β y γ en el modelo hysterético Takeda modificado

Dentro de los parámetros para modelar los ciclos histeréticos y la degradación de rigidez con el modelo de Takeda, se necesitan conocer los valores de β y γ (ec. D.1 y D.2), por lo que se efectuó un estudio de la variación de dichos parámetros para observar los cambios en el ciclo histerético. Para este efecto, se empleó un patrón de desplazamiento (figura D.5), tomado de un estudio experimental de columnas de concreto reforzado de Verderame y colaboradores (2008). El parámetro β se varió en intervalos de 0.25, desde 0.0 hasta 1.0; mientras que el valor de γ , se varió en 0.1, 0.5 y 1.0. Para cada uno de estos valores se calcularon las curvas de histéresis para el sistema de un grado de libertad considerando las propiedades geométricas y mecánicas de la columna C-270A (Verderame *et al.* 2008a).

Se observa de la figura D.6 que el valor de β modifica directamente la rigidez de descarga del lazo exterior. Conforme este valor se va incrementando, se observa un adelgazamiento en el ciclo histerético. Por otro lado, los cambios que produce el valor de γ están referidos a la rigidez del lazo interior y, a simple vista, no se observan diferencias significativas. Finalmente, considerando que las columnas cuentan con niveles superiores de confinamiento que las vigas, se utilizaron diferentes valores de β para el comportamiento histerético de éstas (figura D.7) y se compararon con los resultados experimentales del trabajo de Verderame y colaboradores (2008b).

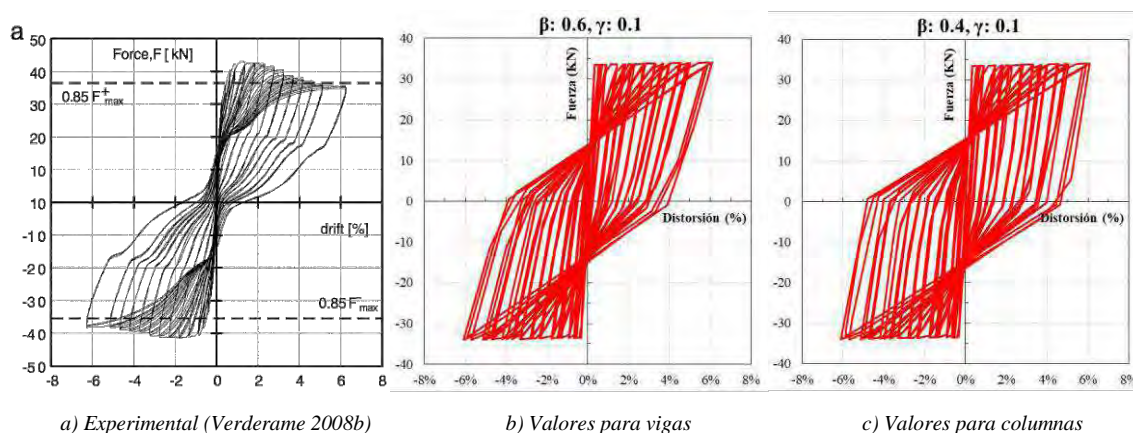


Figura D.7. Valores β para confinamiento de vigas y columnas

Para los elementos de contraventeo se utilizó un modelo histerético llamado “*Steel Buckling*” de MIDAS Gen (2017). Éste es ideal para analizar el pandeo inelástico de este tipo de elementos y, bajo cargas cíclicas reversibles, la capacidad de carga del elemento disminuye conforme aumenta el número de ciclos. Inicialmente, el elemento se encuentra comprimido hasta que se pandea y se somete a tensión hasta su fluencia (MIDAS Gen 2017). Este elemento se basa en los estudios de Black y colaboradores (1980), y se calibró con una prueba experimental de una sección tubular cuadrada, dado que este tipo de secciones son las que se utilizan en el presente trabajo. El protocolo de desplazamiento utilizado se tomó del trabajo de Ikeda y Mahin (1984), y se aprecia en la figura D.8. Aunque los contravientos se diseñaron para que se comporten de manera elástica, se tomaron en cuenta las propiedades no lineales

de estos elementos para monitorear su comportamiento ante las excitaciones sísmicas inducidas a los modelos en estudio. En las figuras D.9a se observa el comportamiento obtenido experimentalmente por Black y colaboradores (1980), y en la figura D.9b se aprecia el obtenido analíticamente por MIDAS Gen. Se aprecia de éstas que, para fines prácticos, el modelo analítico desarrolla los mismos valores de distorsiones y de resistencia (compresión y tensión); sin embargo, la rigidez de descarga es mucho menor que el presentado experimentalmente.

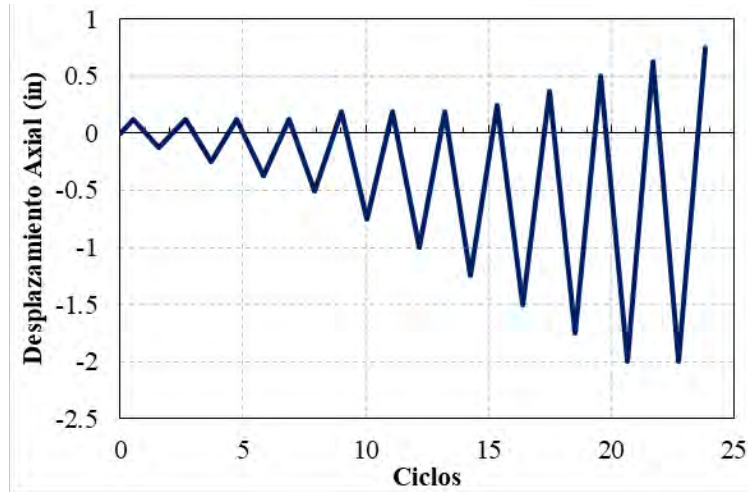
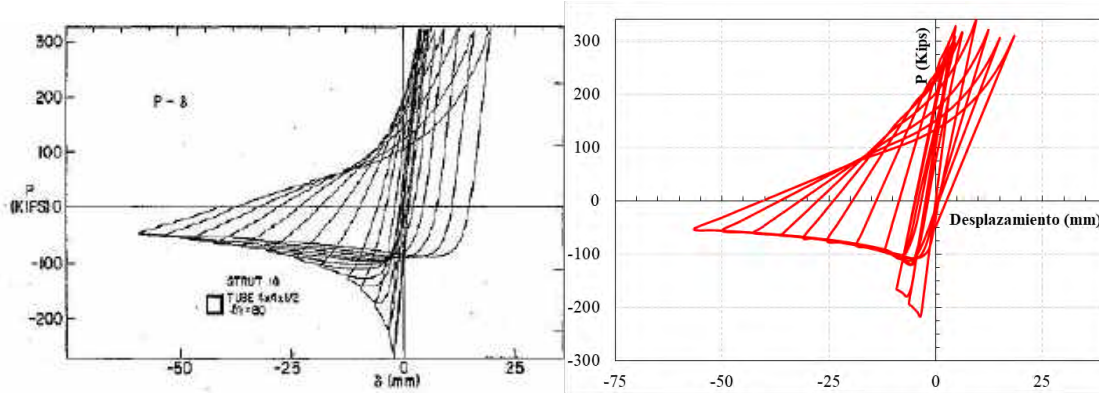


Figura D.8. Patrón de desplazamiento (Adaptado de Ikeda y Mahin 1984)



a) Experimental (Black et al. 1980)

b) Calibración analítica MIDAS Gen

Figura D.9. Ciclos histeréticos para contraventeo con perfiles tubulares

REFERENCIAS

Black, G R, W A B Wenger y E P Popov (1980), “Inelastic buckling of steel struts under cyclic load reversals”, Report No. UCB/EERC-80/40, College of Engineering, University of California at Berkeley.

Ikeda, K, y S A Mahin (1984), “A refined physical theory model for predicting the seismic behavior of braced steel frames”, Report No. UCB/EERC-84/12, College of Engineering, University of California at Berkeley.

Verderame, M G, G Fabbrocino y Manfredi G (2008a). “Seismic response of R.C. columns with smooth reinforcement. Part I: Monotonic tests”. *Engineering Structures*, No. 30, pp. 2277-2288.

Verderame, M G, G Fabbrocino y Manfredi G (2008b). “Seismic response of R.C. columns with smooth reinforcement. Part II: Cyclic tests”. *Engineering Structures*, No. 30, pp. 2289-2300.

15. Apéndice E. Registros de aceleración y espectros de respuesta

A continuación se presentan en las figuras E.1 a E.3, todos los acelerogramas utilizados para los análisis dinámicos no lineales paso a paso. Cada uno de éstos se encuentra corregido por línea base y con un filtro pasa-banda con límites superior e inferior de 0.1 Hz y 10 Hz respectivamente. Dentro de la base de datos que componen estos acelerogramas, se tienen eventos de los máximos sismos registrados recientemente en Ciudad de México (1985 y 2017), así como generados de manera artificial (Godínez 2005).

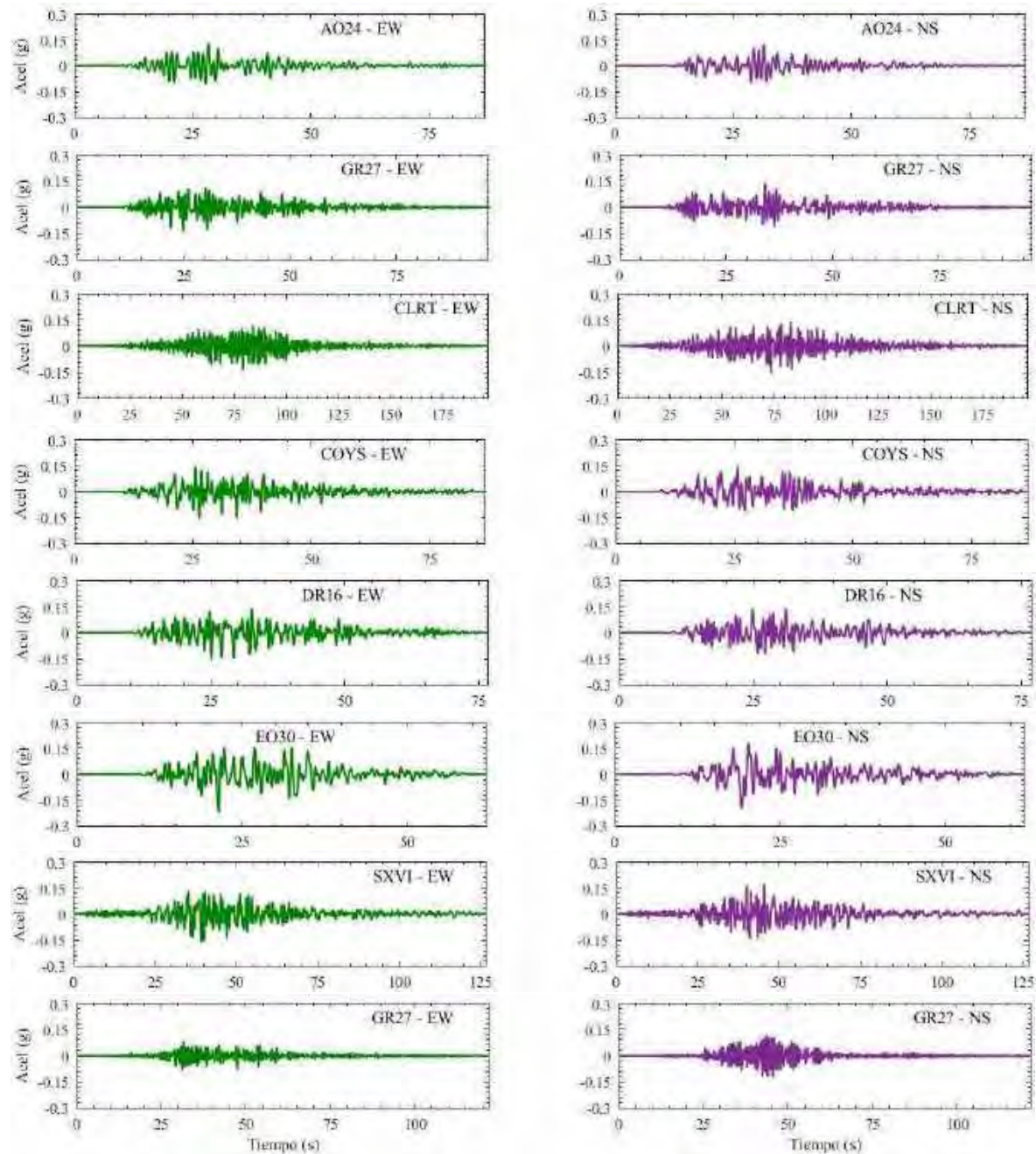


Figura E.1. Registros de aceleración para zona de transición de Ciudad de México

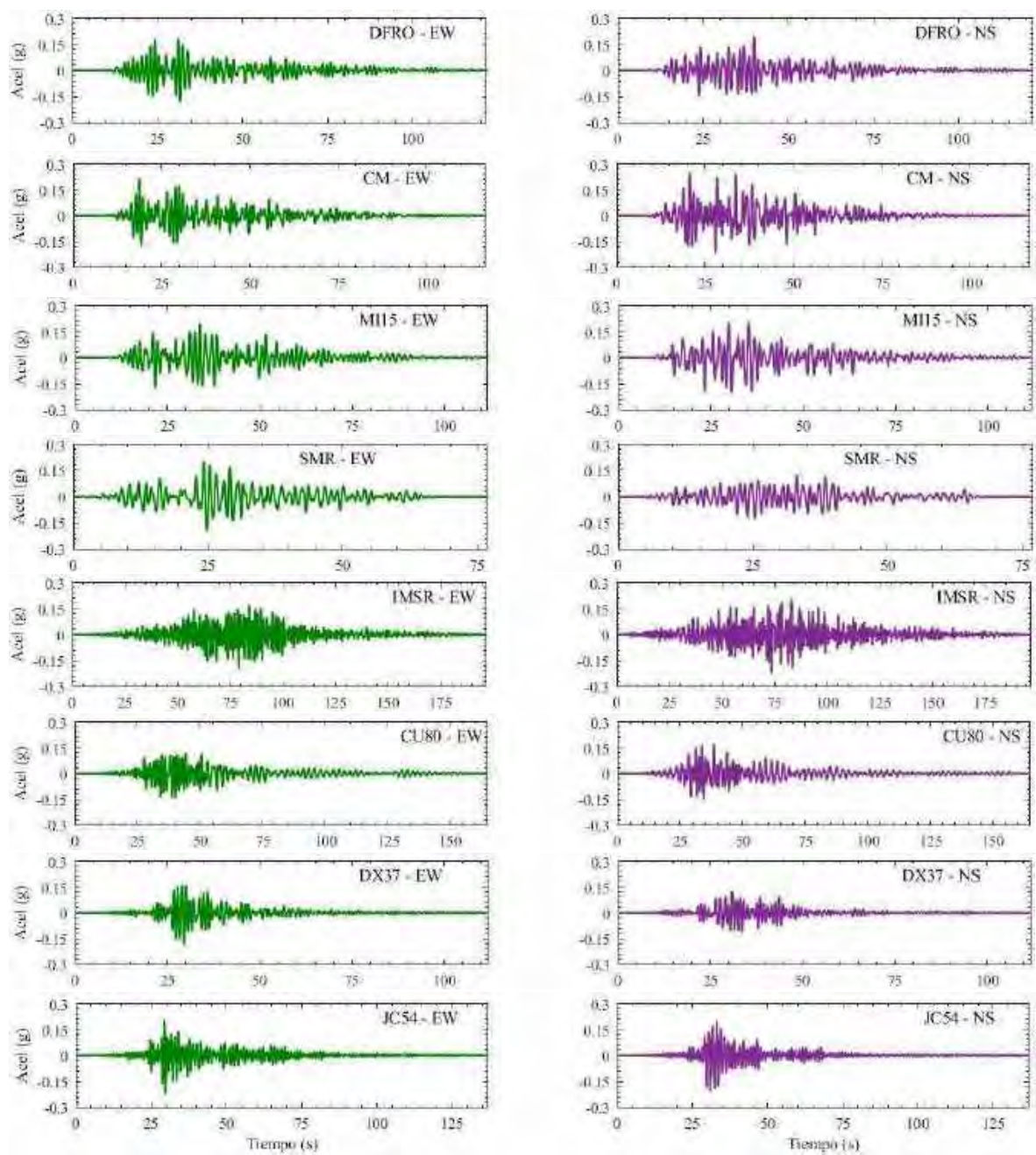


Figura E.2. Registros de aceleración para zona IIIa de Ciudad de México

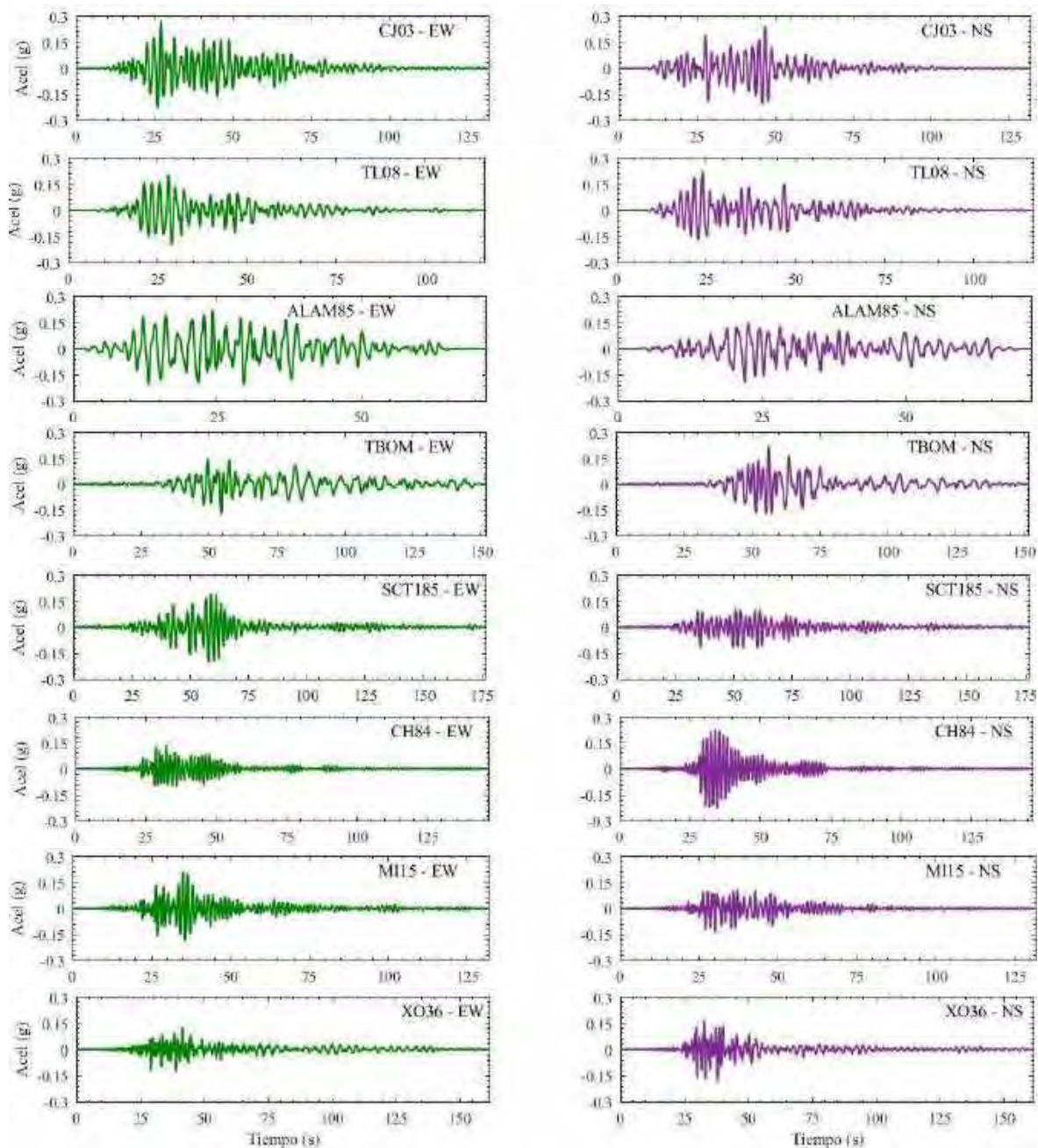


Figura E.3. Registros de aceleración para zona IIIb de Ciudad de México

Para cada uno de estos registros de aceleración (figuras E.1 a E.3), se obtuvieron sus correspondientes espectros de respuesta con un amortiguamiento del 5% (figuras E.4 a E.27), con el objetivo de comprobar que cada uno de éstos fuera representativo de la zona para la cual se diseñaron los edificios en estudio, del presente trabajo de investigación. Como parte de la representación gráfica se tienen de color verde aquellos espectros para la dirección EW y en color púrpura aquéllos para la dirección NS. En algunos casos se utilizó un factor de escalado para que los espectros alcanzaran el máximo valor de la meseta del espectro elástico (color negro).

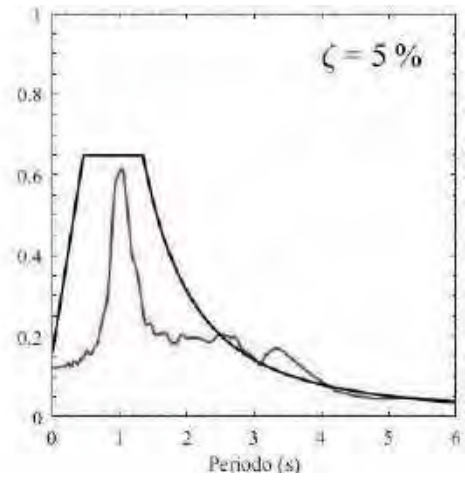
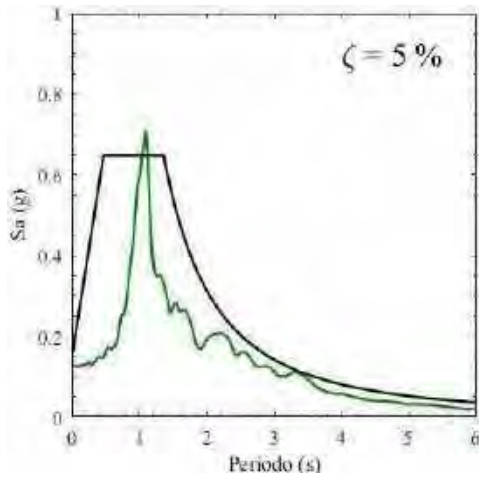


Figura E.4. Espectro de respuesta para el registro AO24 (sintético), zona II

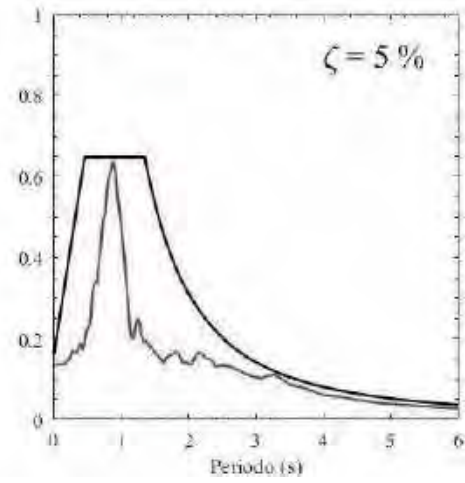
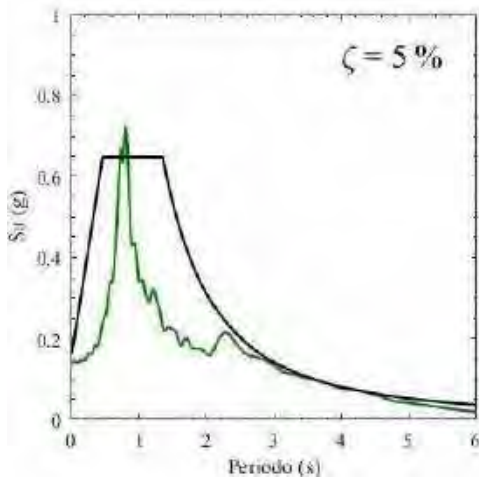


Figura E.5. Espectro de respuesta para el registro GR27 (sintético), zona II

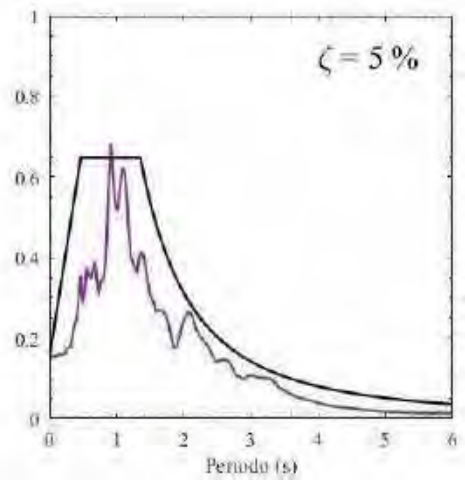
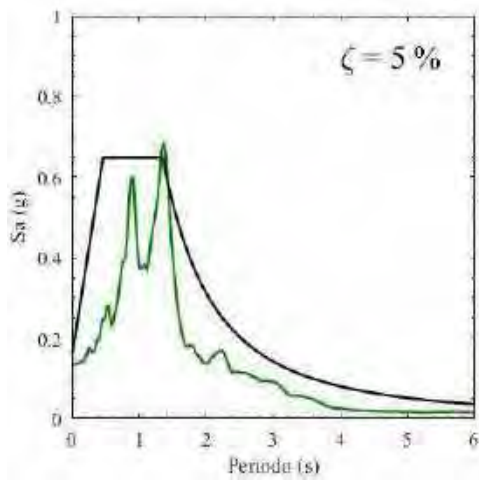


Figura E.6. Espectro de respuesta para el registro CLRT (sintético), zona II

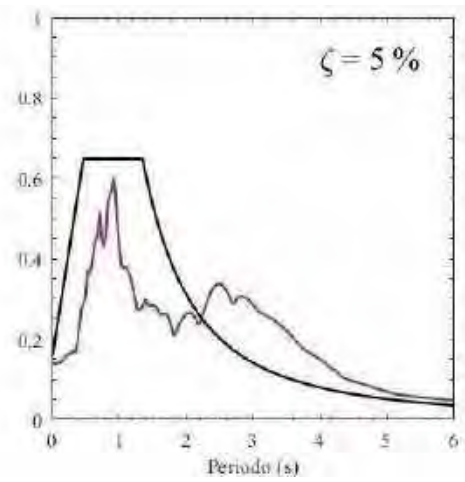
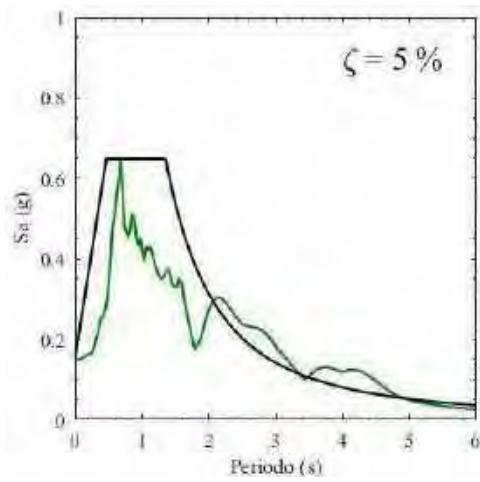


Figura E.7. Espectro de respuesta para el registro COYS (sintético), factor de escalado de 1.96, zona II

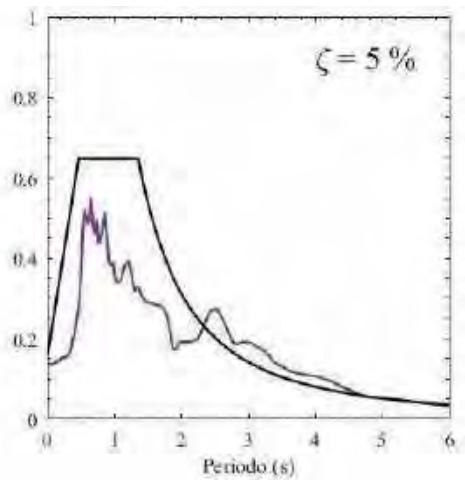
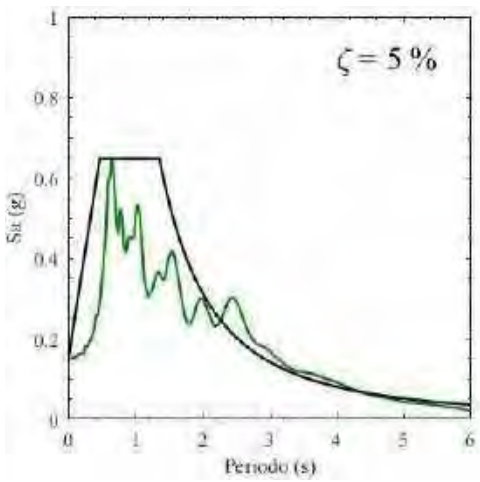


Figura E.8. Espectro de respuesta para el registro DR16 (sintético), factor de escalado de 2.00, zona II

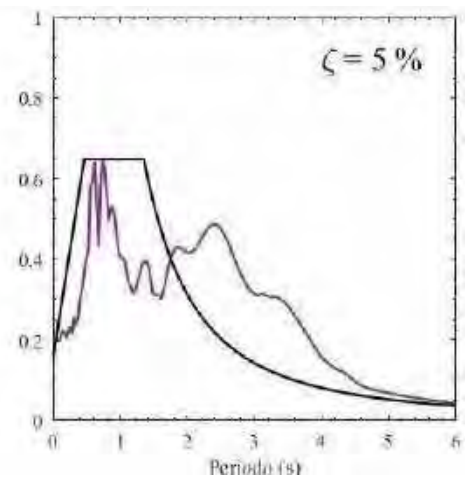
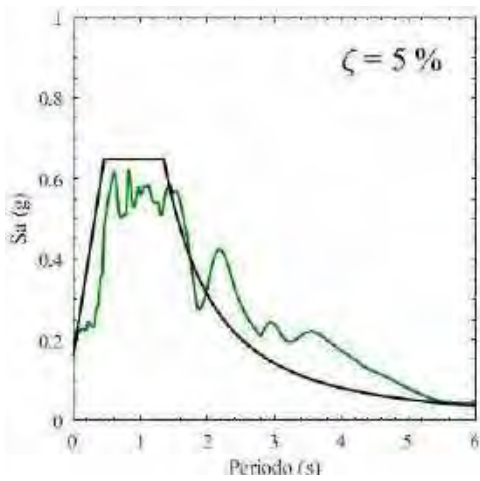


Figura E.9. Espectro de respuesta para el registro EO30 (sintético), factor de escalado de 2.93, zona II

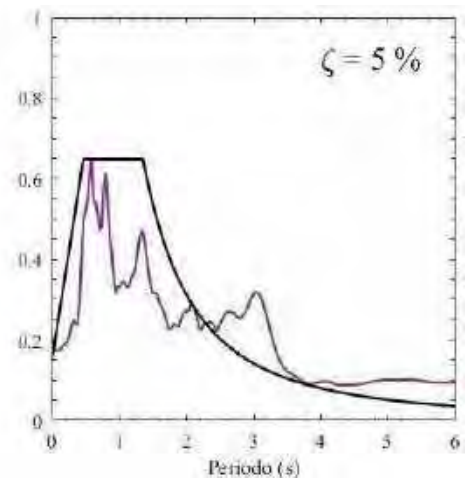
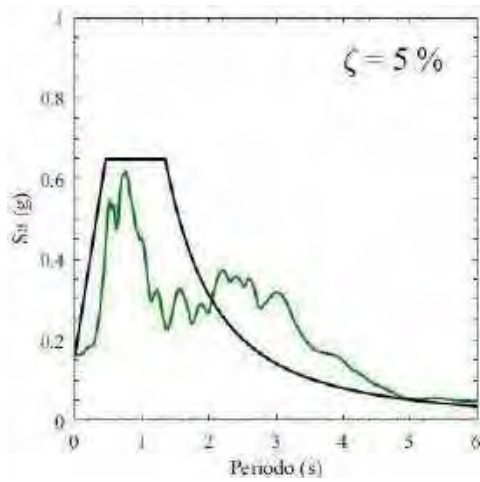


Figura E.10. Espectro de respuesta para el registro SXVI (sismo 1985, zona II)

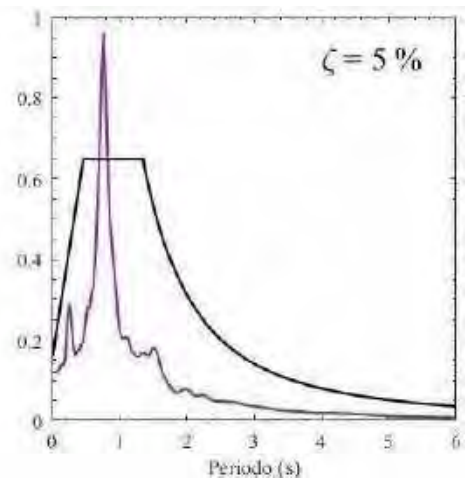
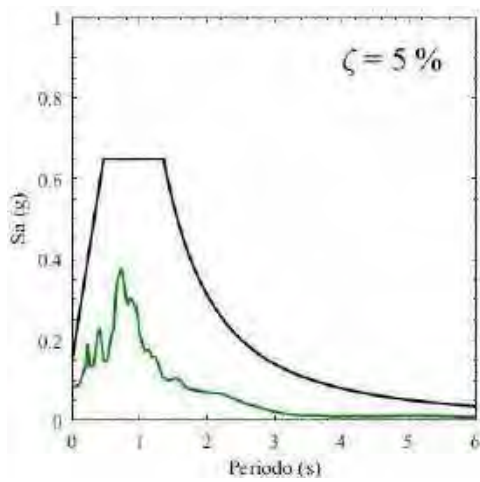


Figura E.11. Espectro de respuesta para el registro GR27 (sismo 2017), zona II

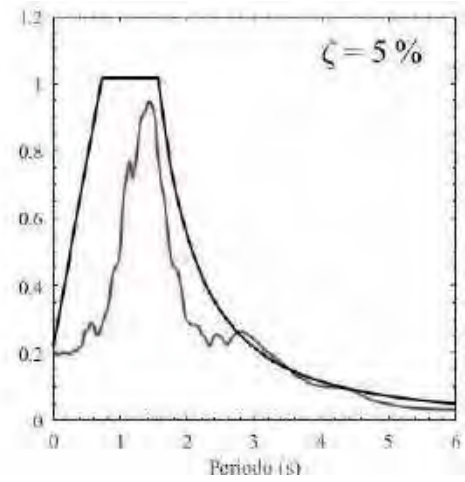
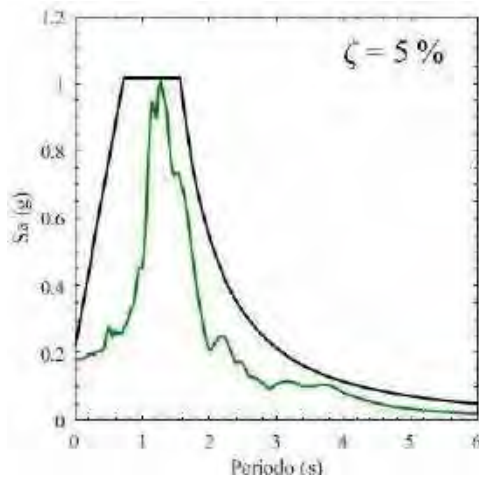


Figura E.12. Espectro de respuesta para el registro DFRO (sintético), zona IIIa

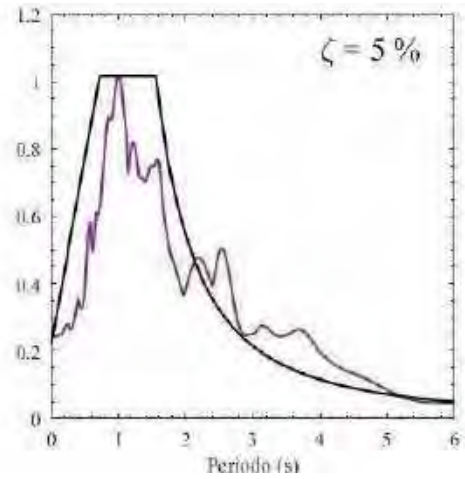
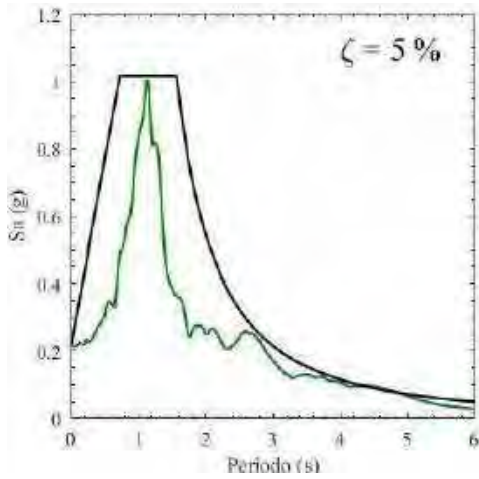


Figura E.13. Espectro de respuesta para el registro CM (sintético), factor de escalado 1.05, zona IIIa

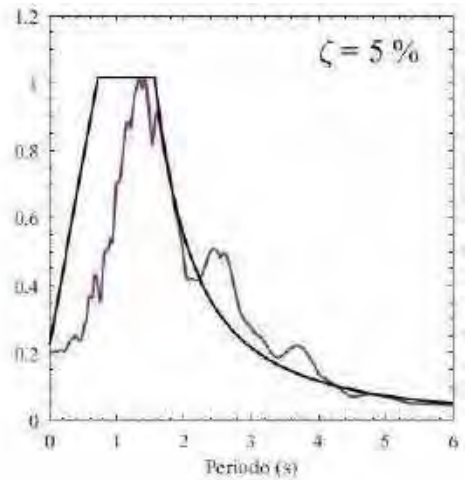
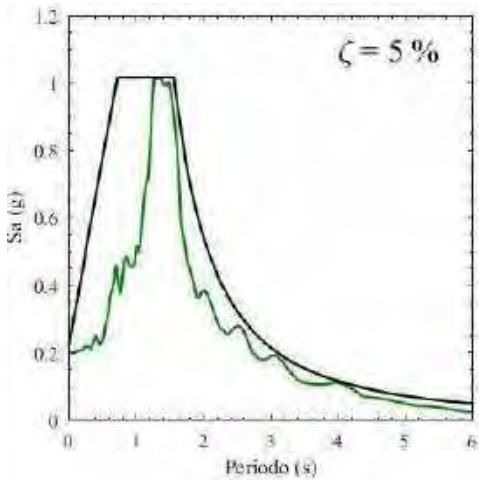


Figura E.14. Espectro de respuesta para el registro MI15 (sintético), factor de escalado 1.08, zona IIIa

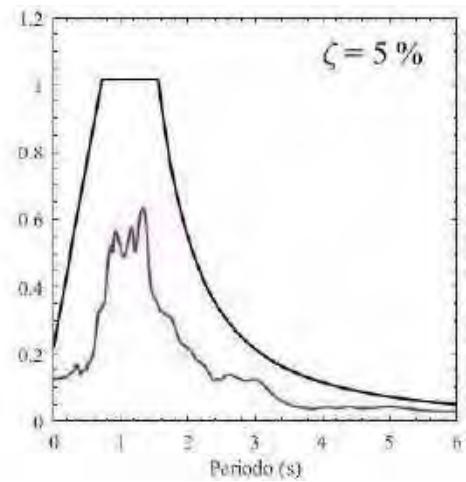
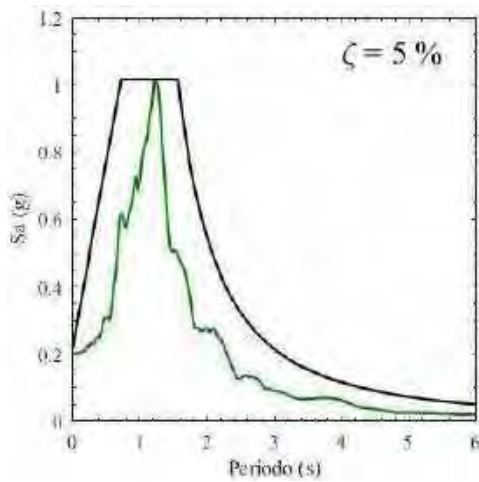


Figura E.15. Espectro de respuesta para el registro MI15 (sintético), factor de escalado 1.09, zona IIIa

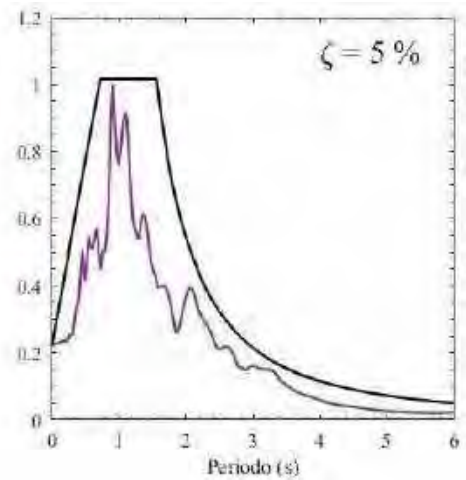
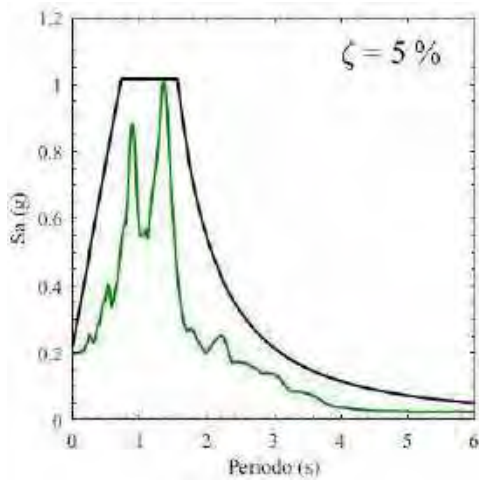


Figura E.16. Espectro de respuesta para el registro IMSR (sintético), factor de escalado 1.46, zona IIIa

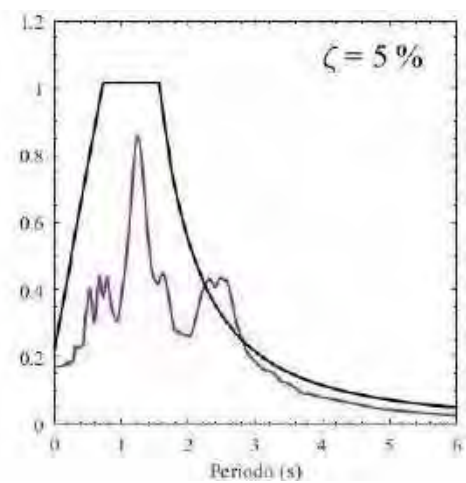
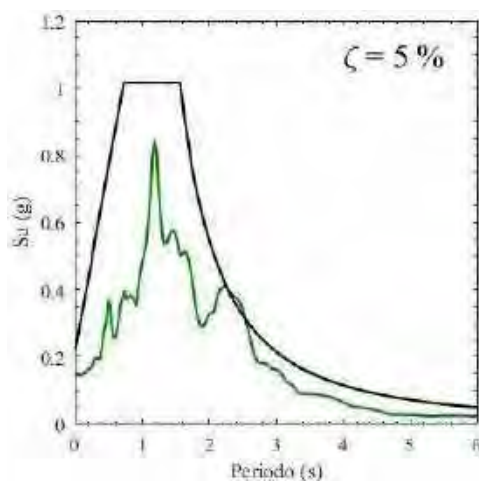


Figura E.17. Espectro de respuesta para el registro CU80 (sismo 2017), zona IIIa

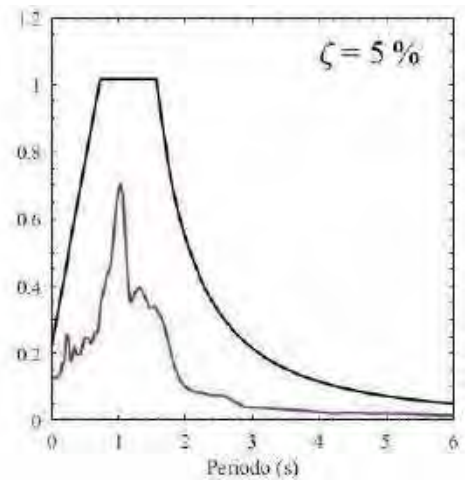
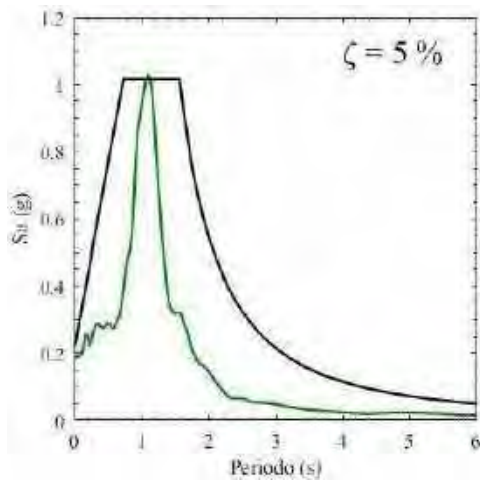


Figura E.18. Espectro de respuesta para el registro DX37 (sismo 2017), zona IIIa

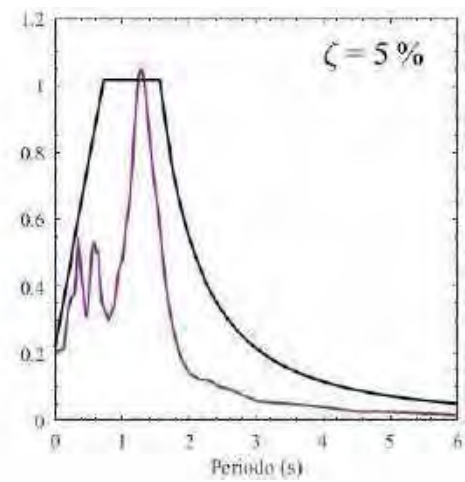
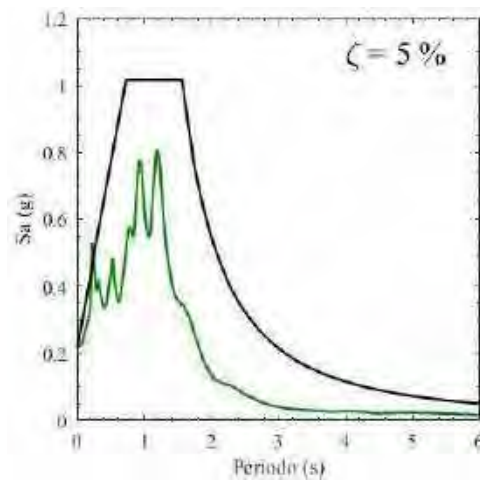


Figura E.19. Espectro de respuesta para el registro JC54 (sismo 2017), zona IIIa

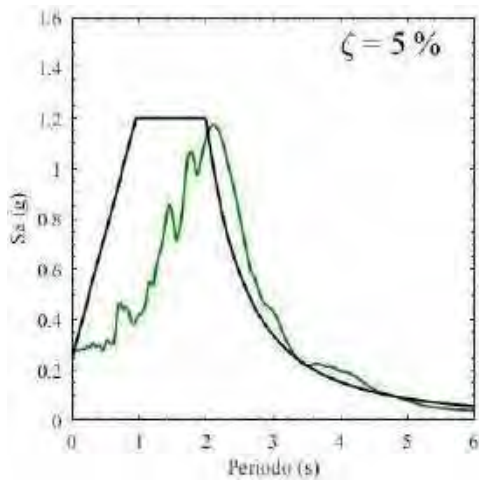


Figura E.20. Espectro de respuesta para el registro CJ03 (sintético), zona IIIb

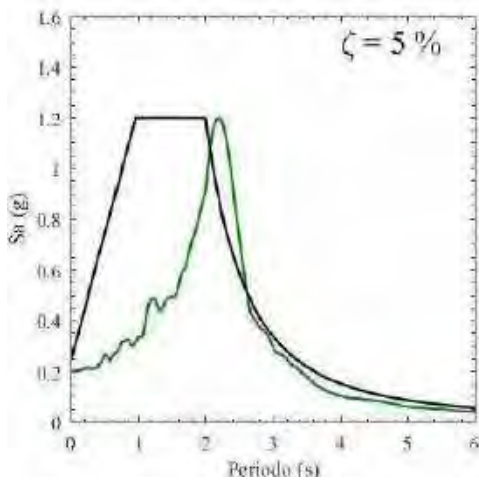
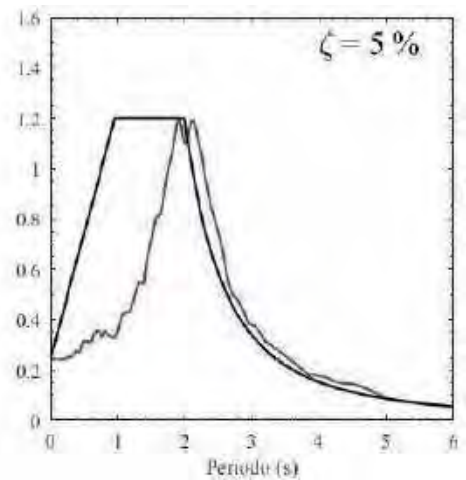


Figura E.21. Espectro de respuesta para el registro TL08 (sintético), factor de escalado 1.04, zona IIIb

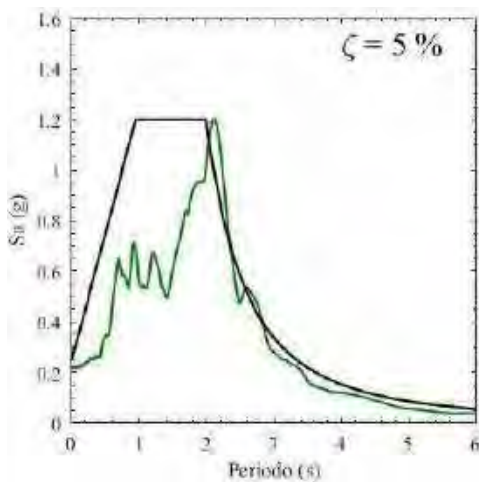
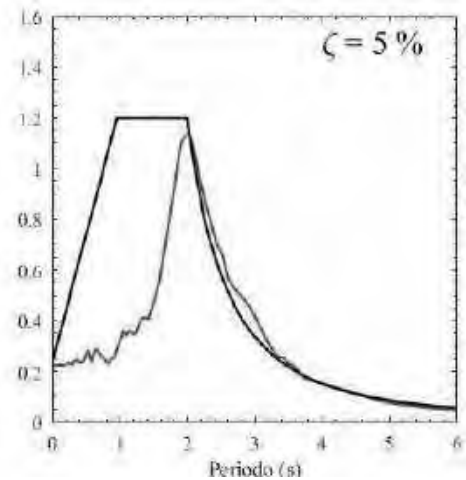
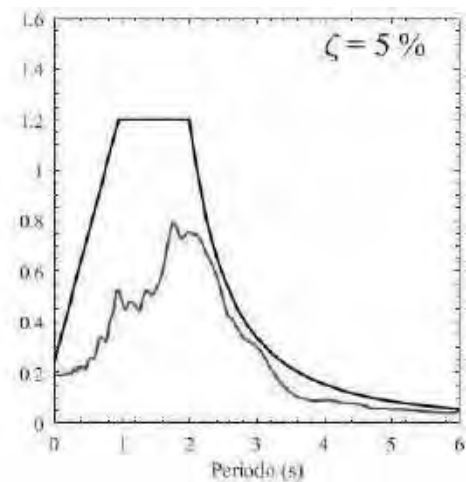


Figura E.22. Espectro de respuesta para el registro ALAM85 (sintético), factor de escalado 1.29, zona IIIb



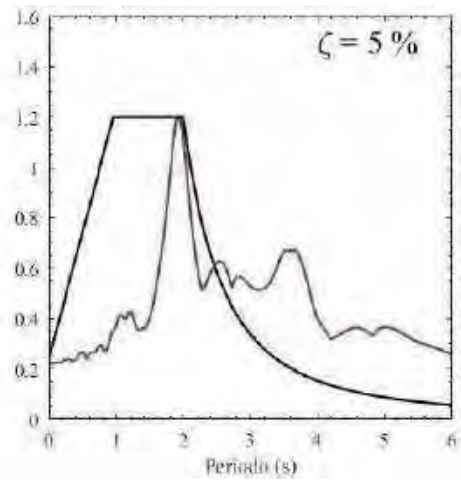
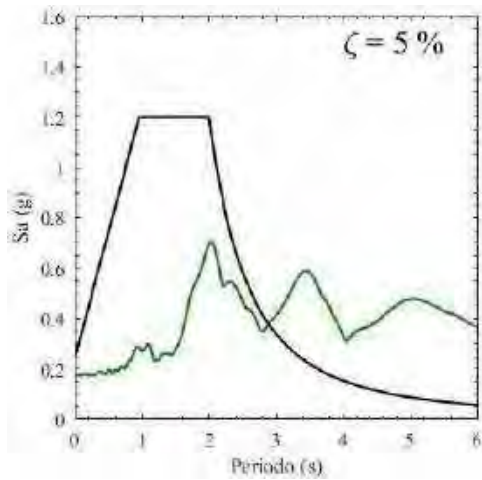


Figura E.23. Espectro de respuesta para el registro TBOM (sismo 1985), factor de escalado 1.63, zona IIIb

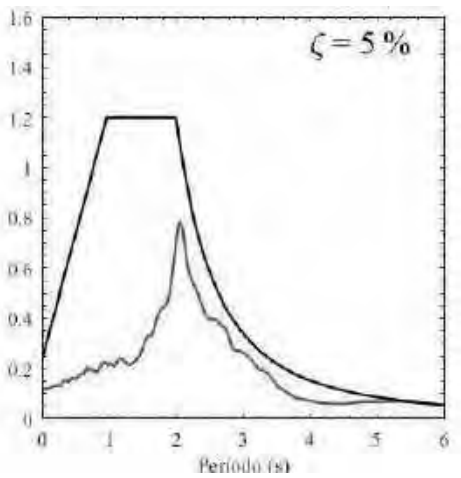
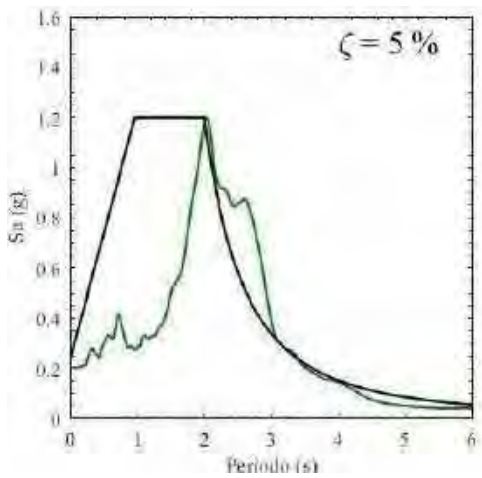


Figura E.24. Espectro de respuesta para el registro SCT185 (sismo 1985), factor de escalado 1.10, zona IIIb

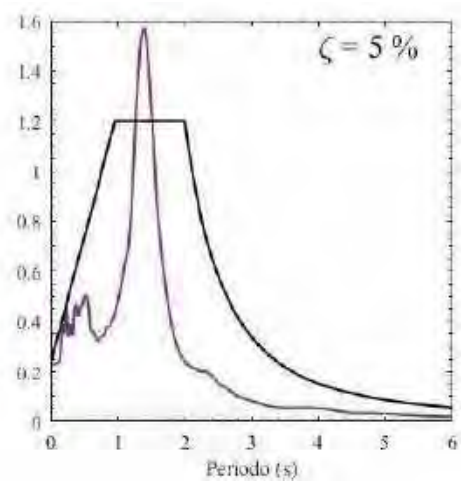
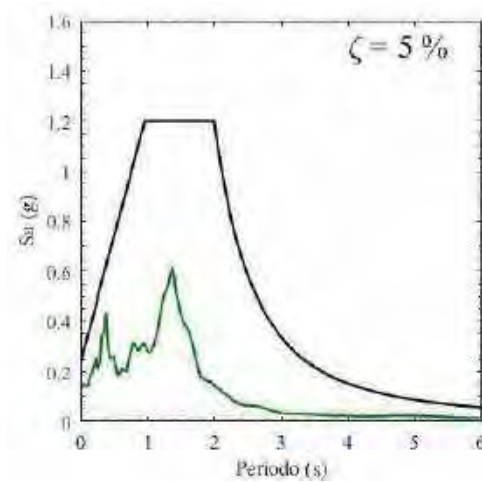


Figura E.25. Espectro de respuesta para el registro CH84 (sismo 2017), zona IIIb

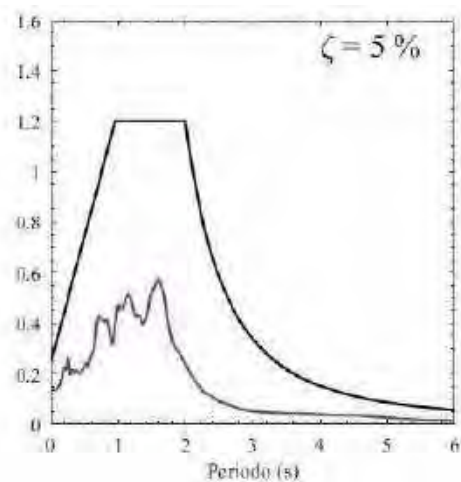
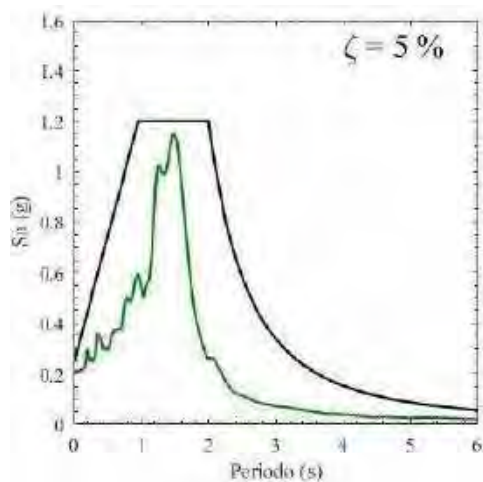


Figura E.26. Espectro de respuesta para el registro MI15 (sismo 2017), zona IIIb

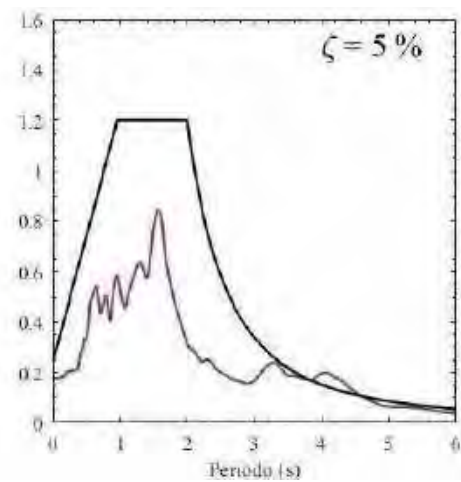
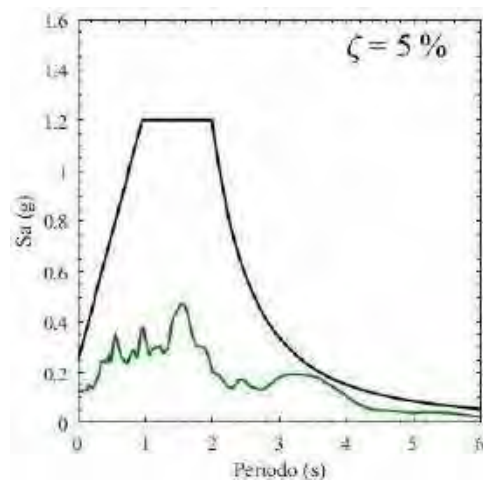


Figura E.27. Espectro de respuesta para el registro XO36 (sismo 2017), zona IIIb

16. Apéndice F. Resultados para edificio de ocho entresijos con análisis dinámicos paso a paso no lineales

A continuación se presentan todos los resultados generados por los ocho pares de registros de aceleración, representativos de la zona II, inducidos de manera simultánea a los edificios con ocho entresijos; se presentan aquéllos considerando su base como rígida, así como también los obtenidos tomando en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura.

F.1 Base Rígida

F.1.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS

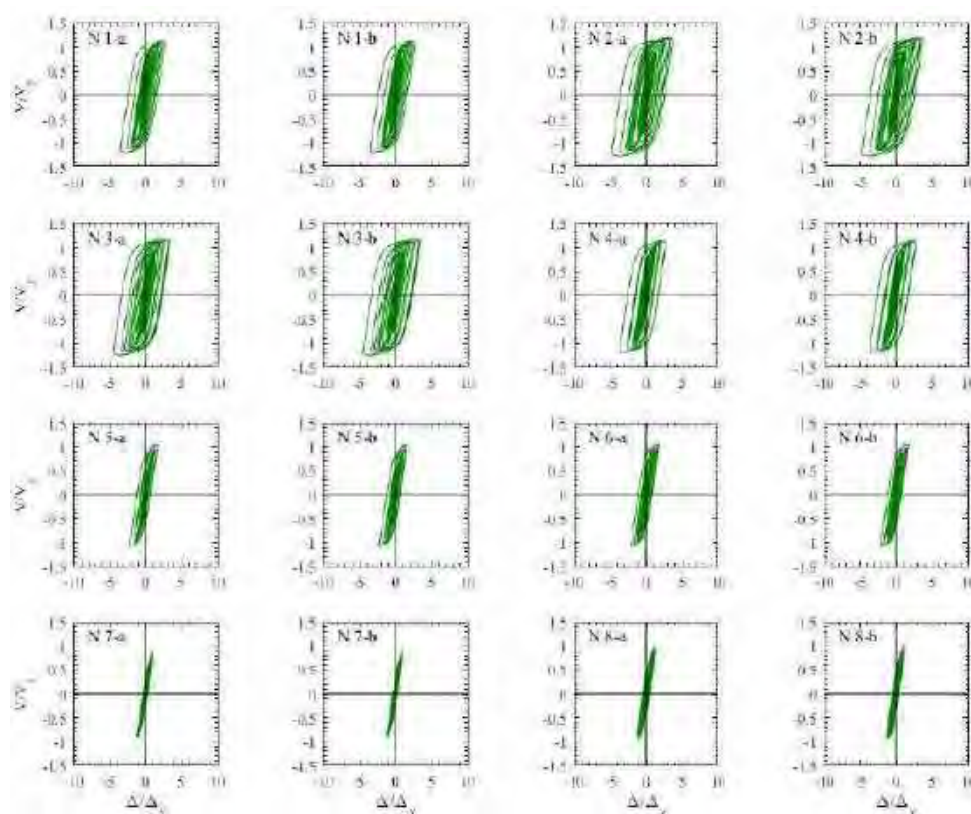


Figura F.1. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración AO24-A

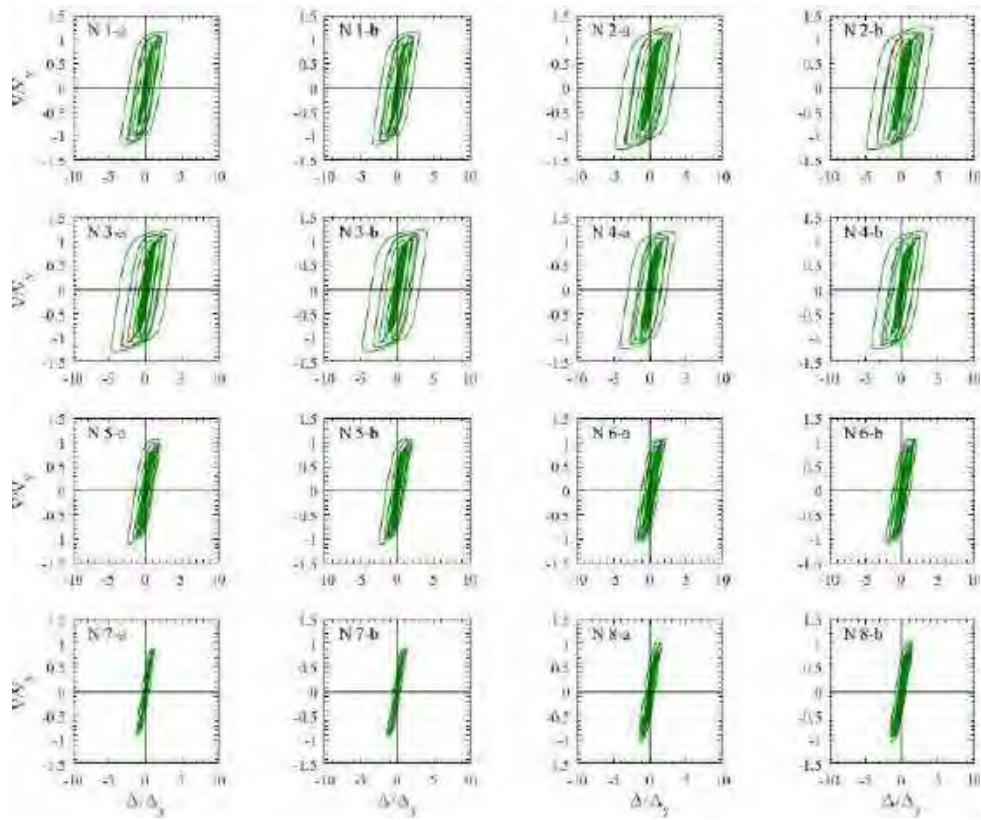


Figura F.2. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración AO24-B

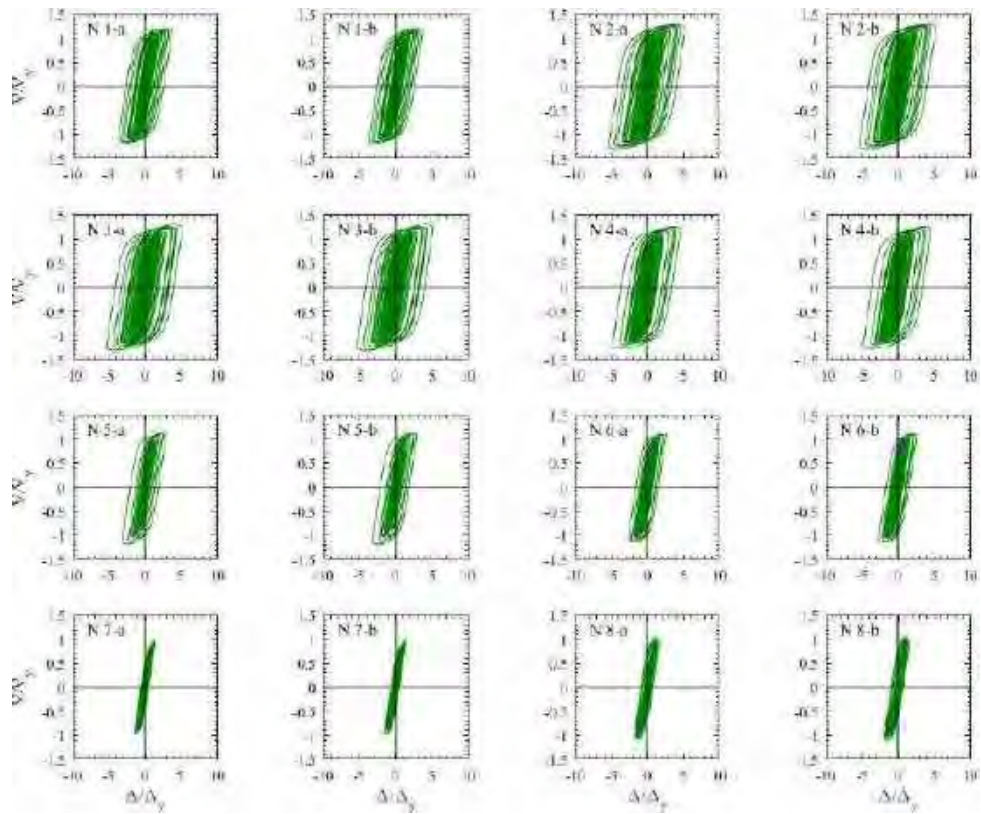


Figura F.3. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CLRT-A

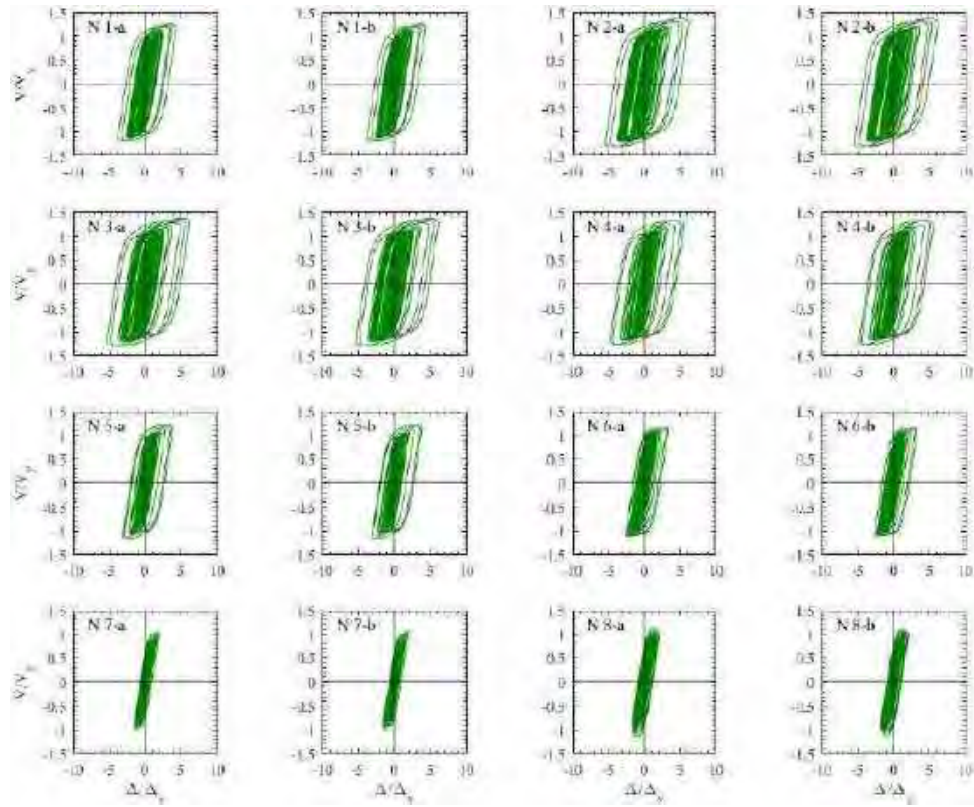


Figura F.4. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CLRT-B

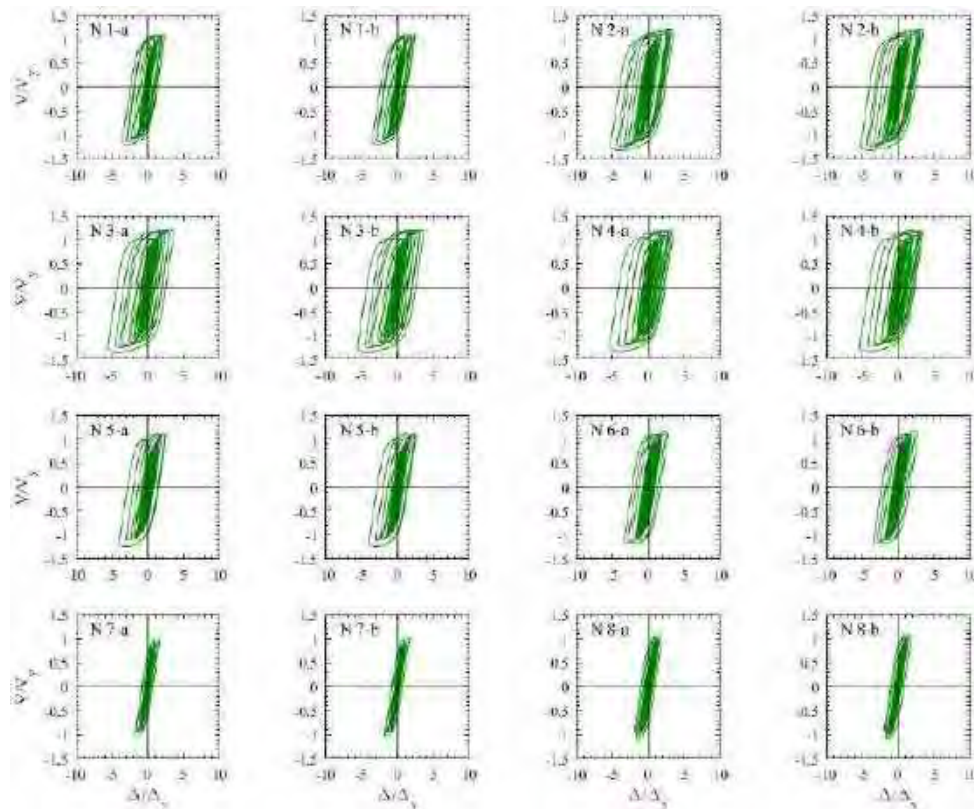


Figura F.5. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración COYS-A

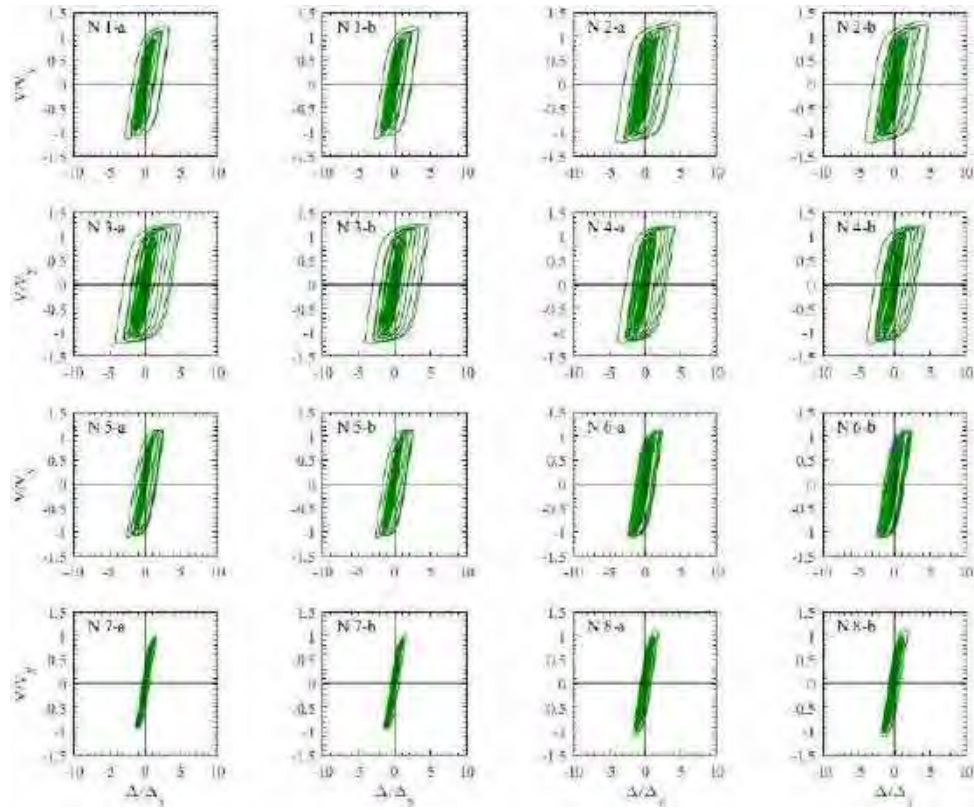


Figura F.6. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración COYS-B

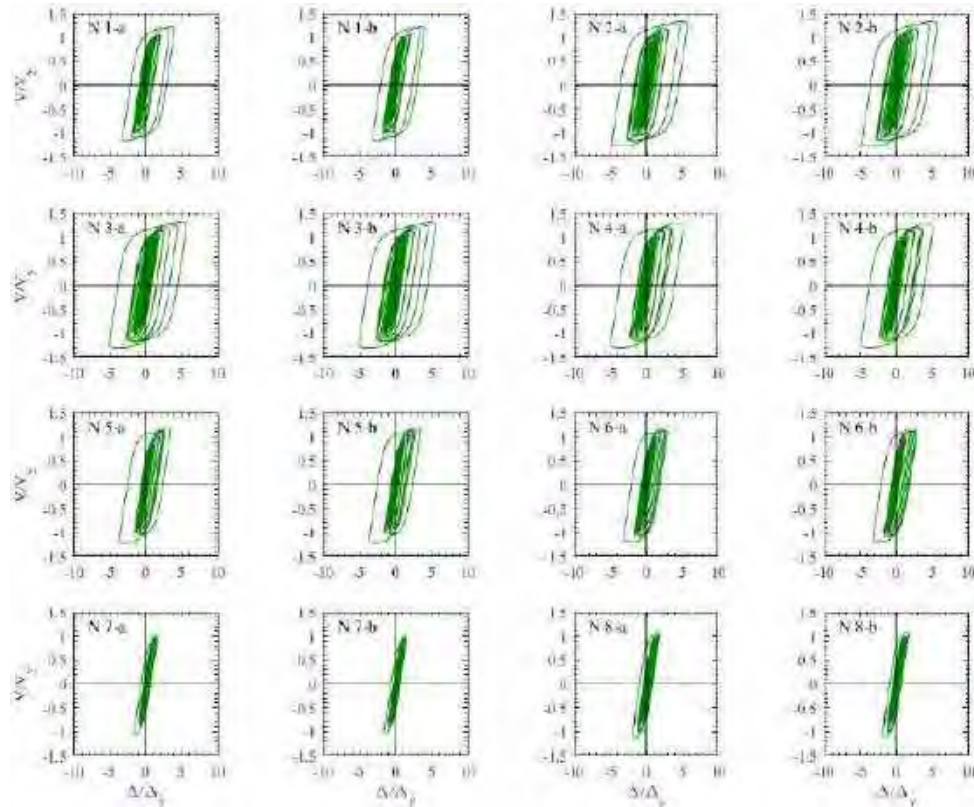


Figura F.7. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DR16-A

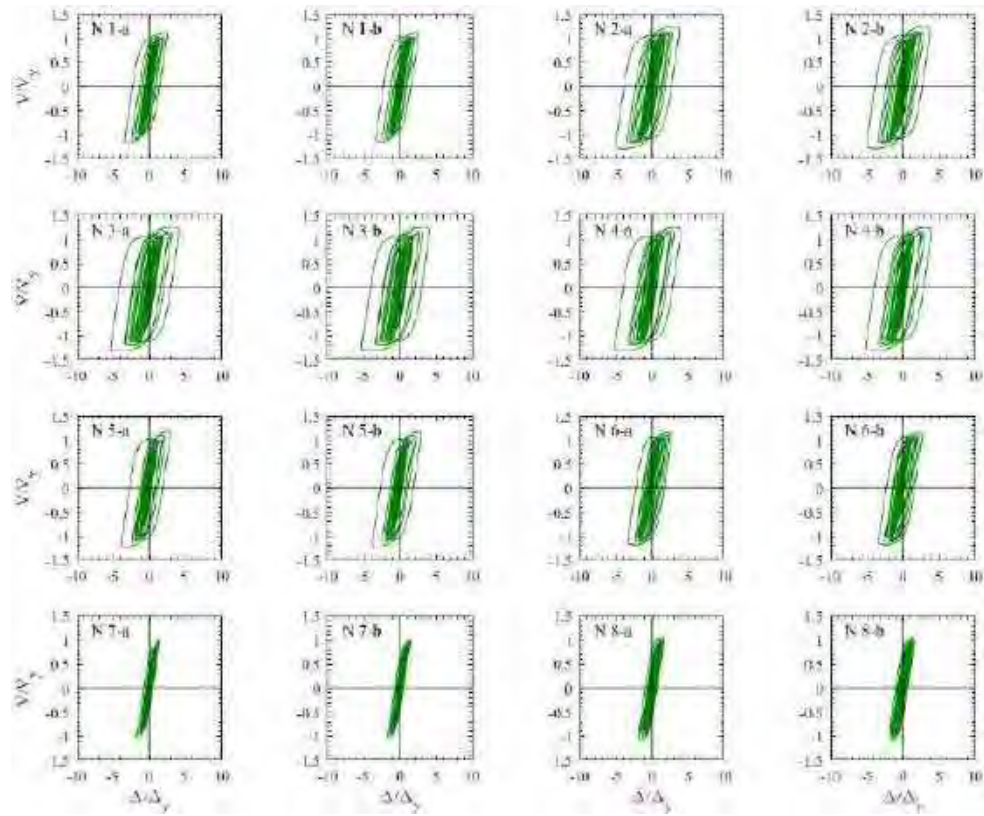


Figura F.8. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DR16-B

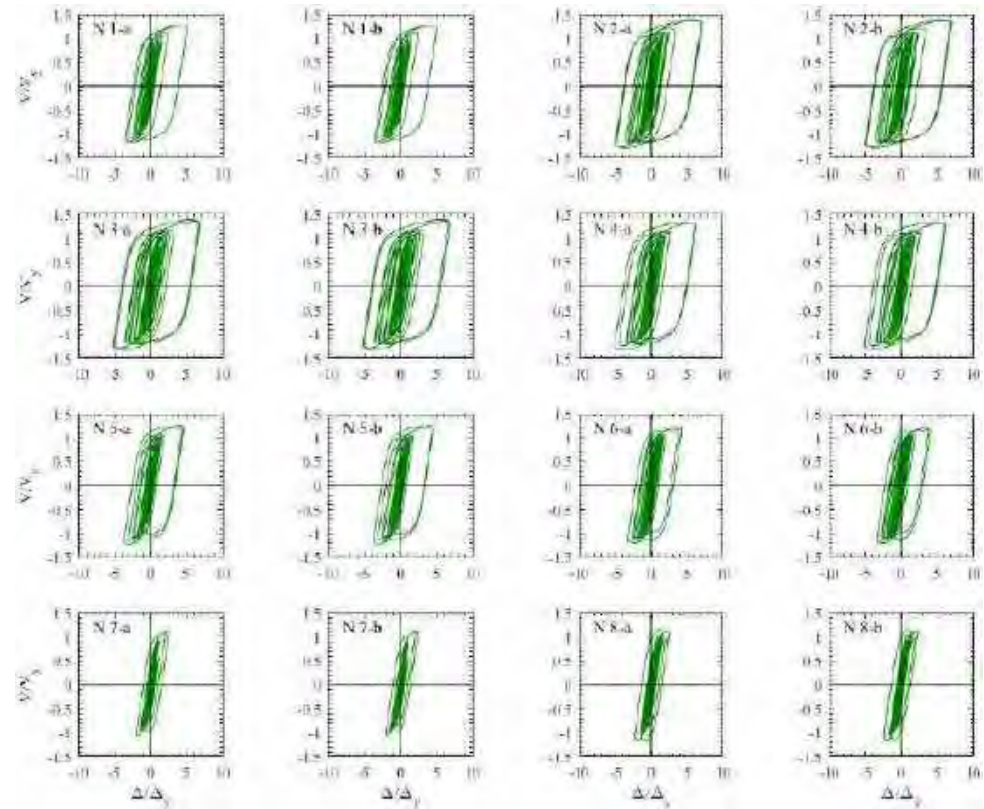


Figura F.9. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración EO30-A

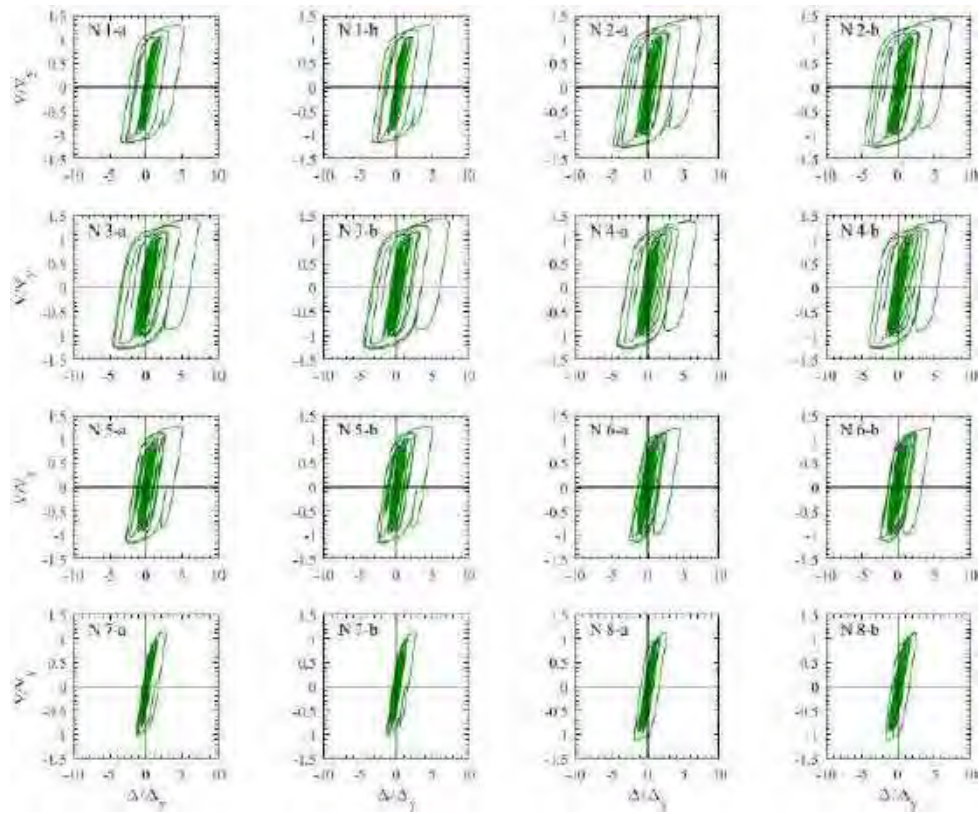


Figura F.10. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración EO30-B

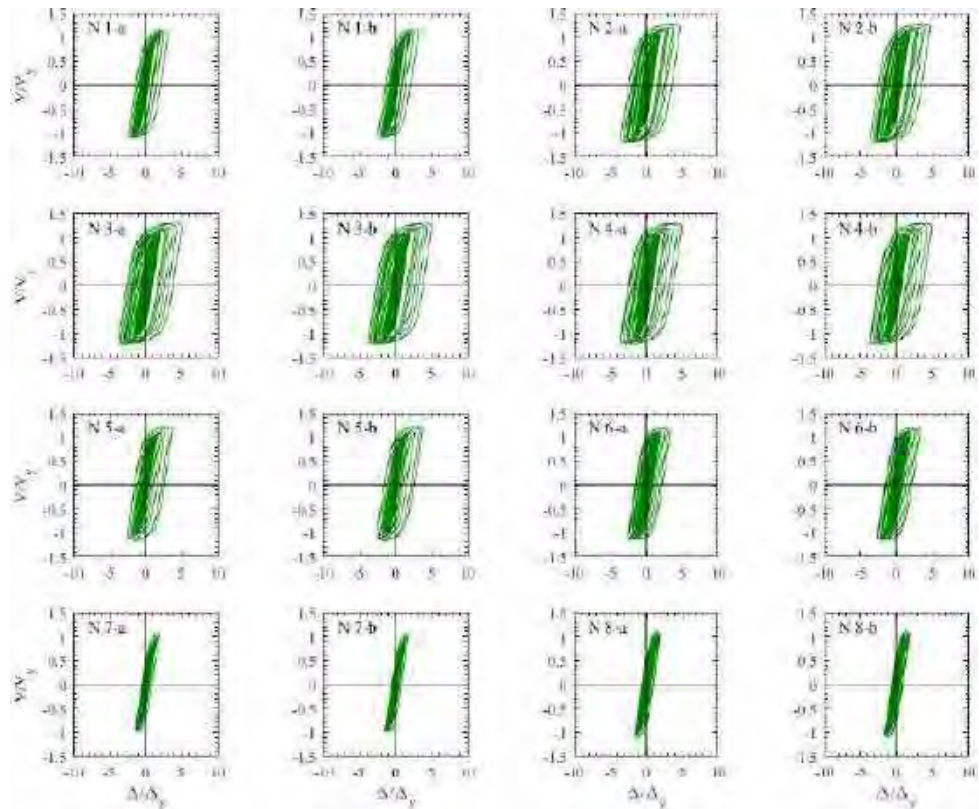


Figura F.11. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración GR27-A

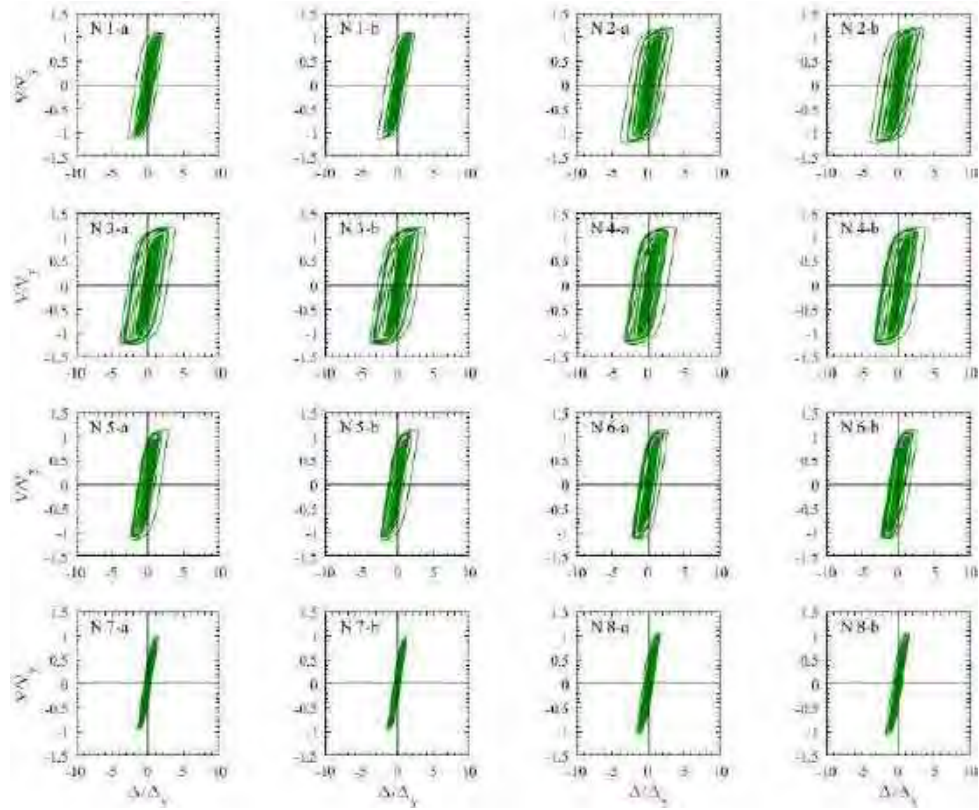


Figura F.12. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración GR27-B

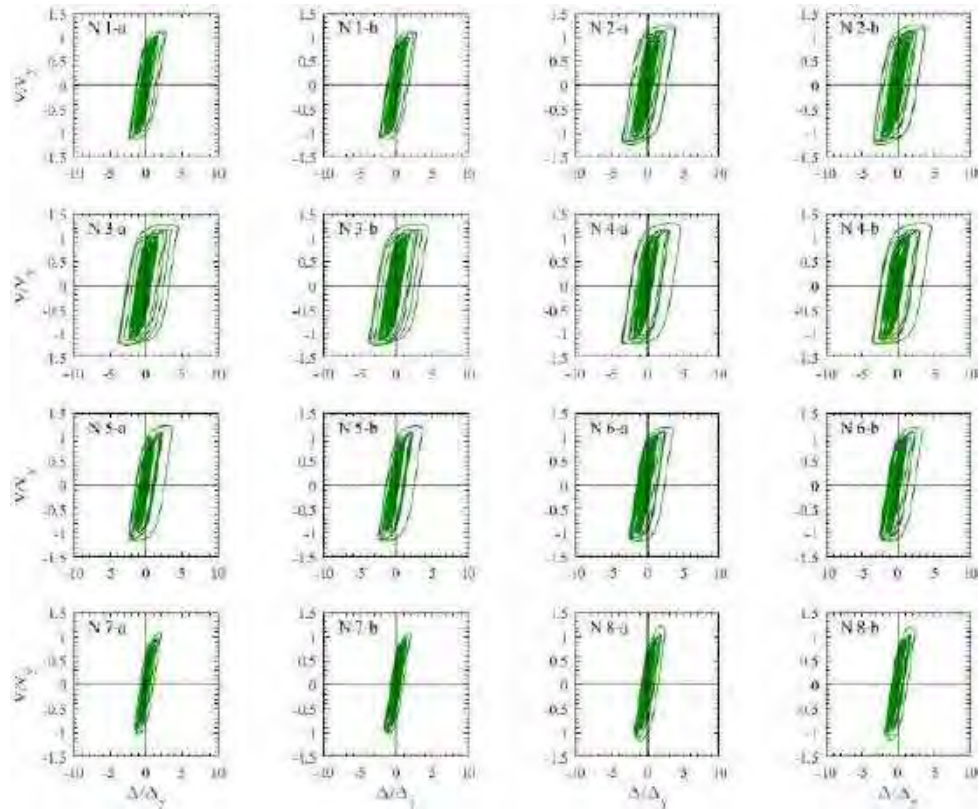


Figura F.13. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SXVI-A (1985)

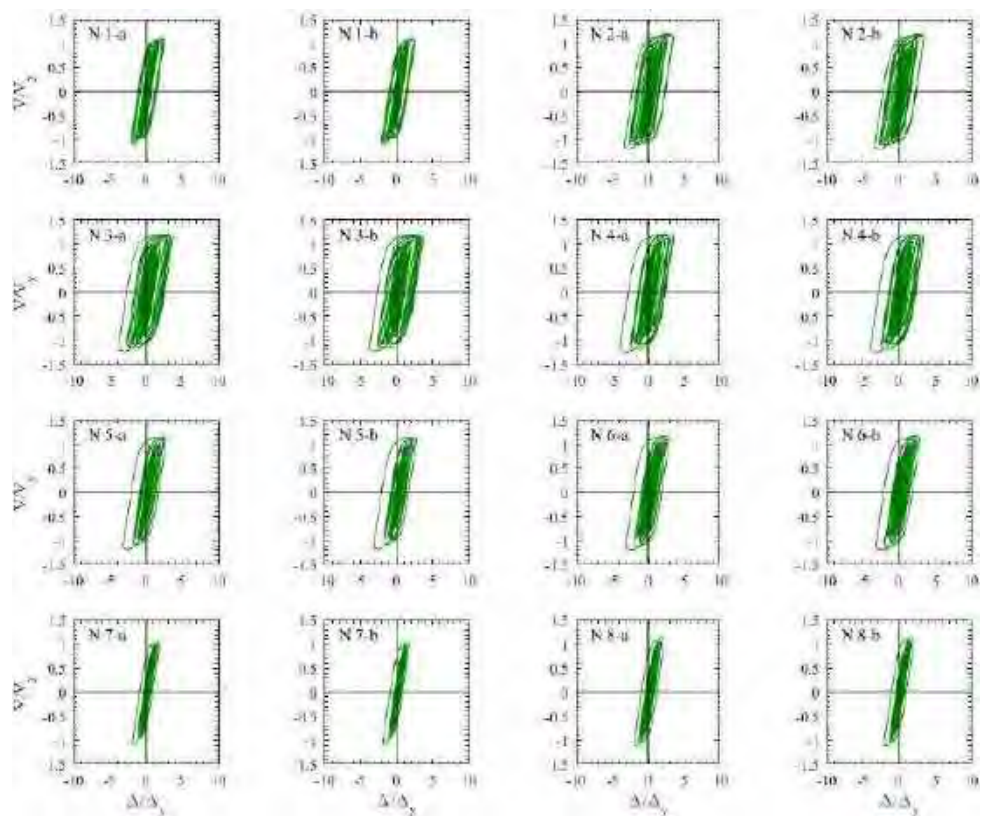


Figura F.14. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SXVI-B (1985)

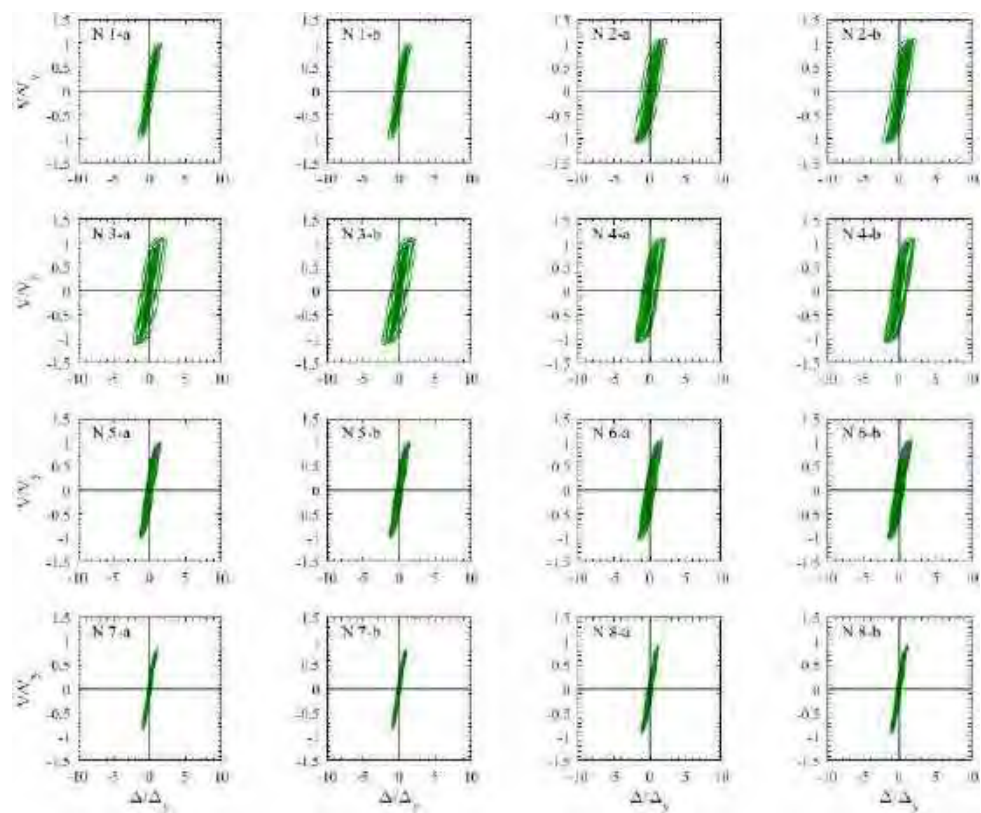


Figura F.15. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración GR27-A (2017)

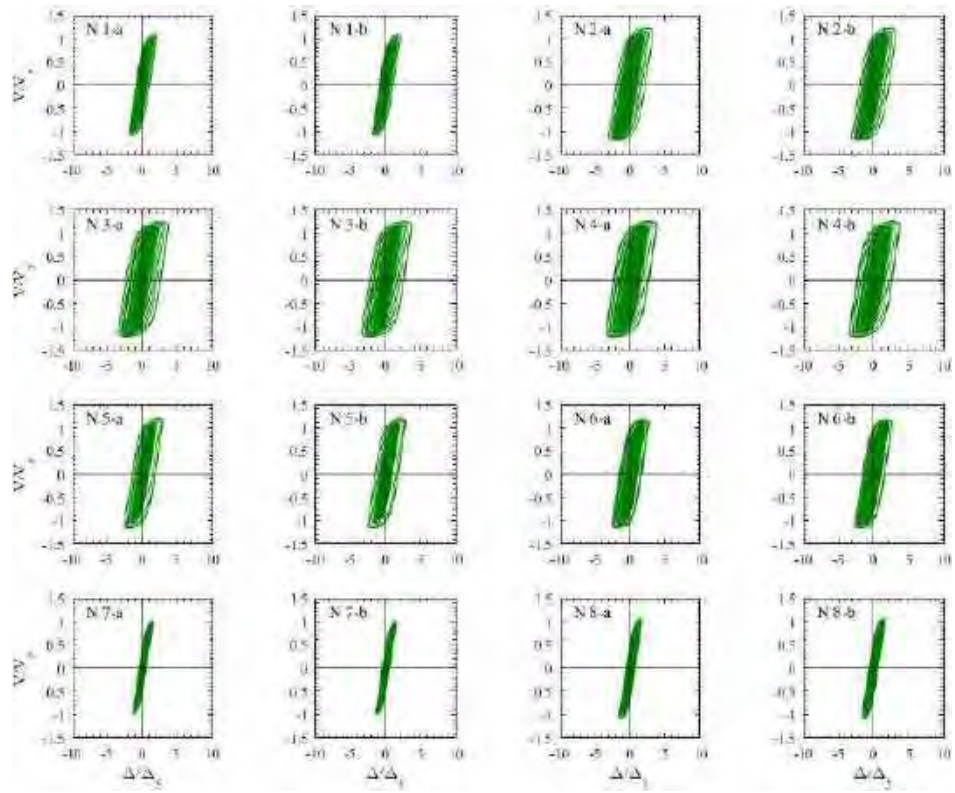


Figura F.16. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.1.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB

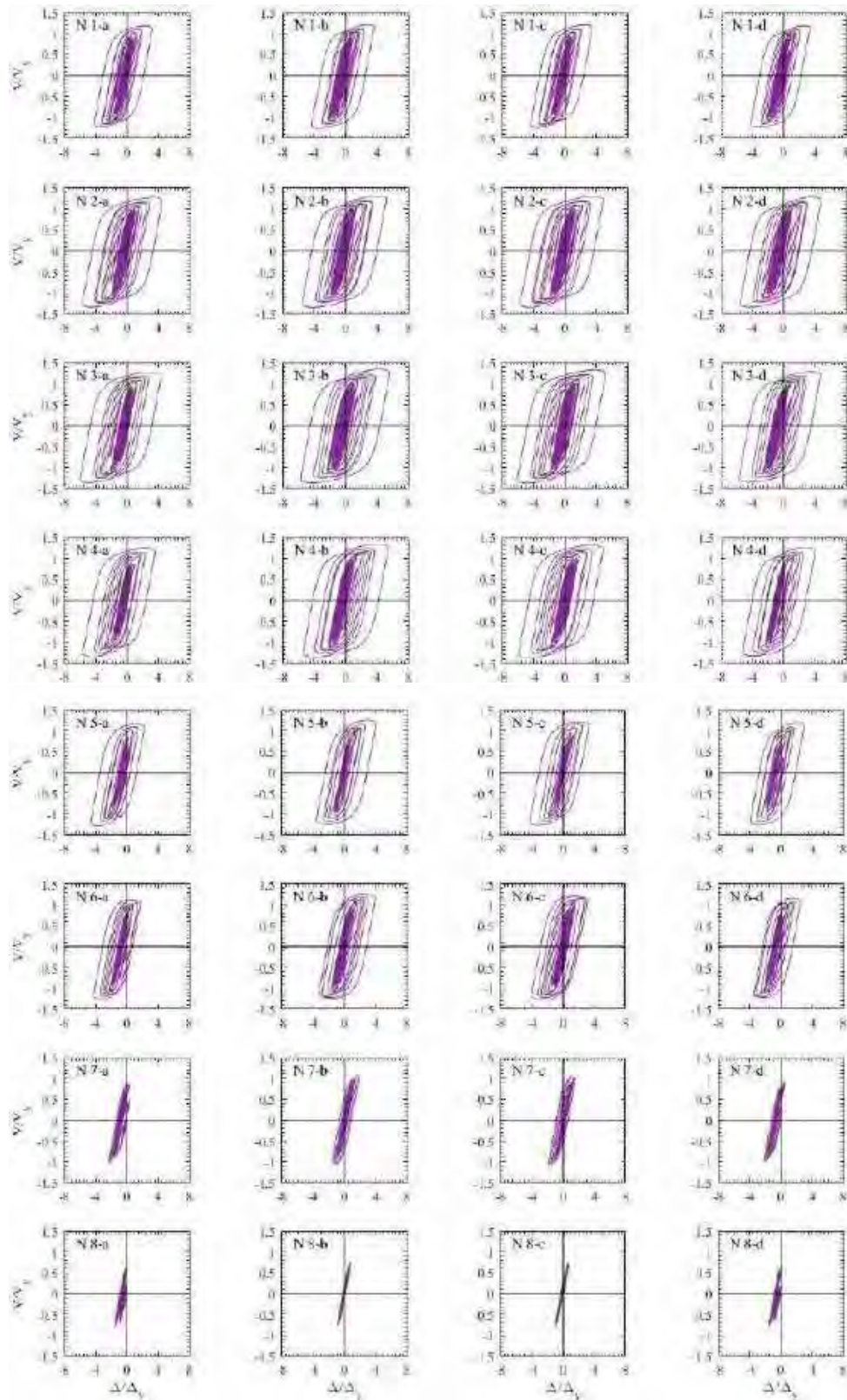


Figura F.17. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración AO24-A

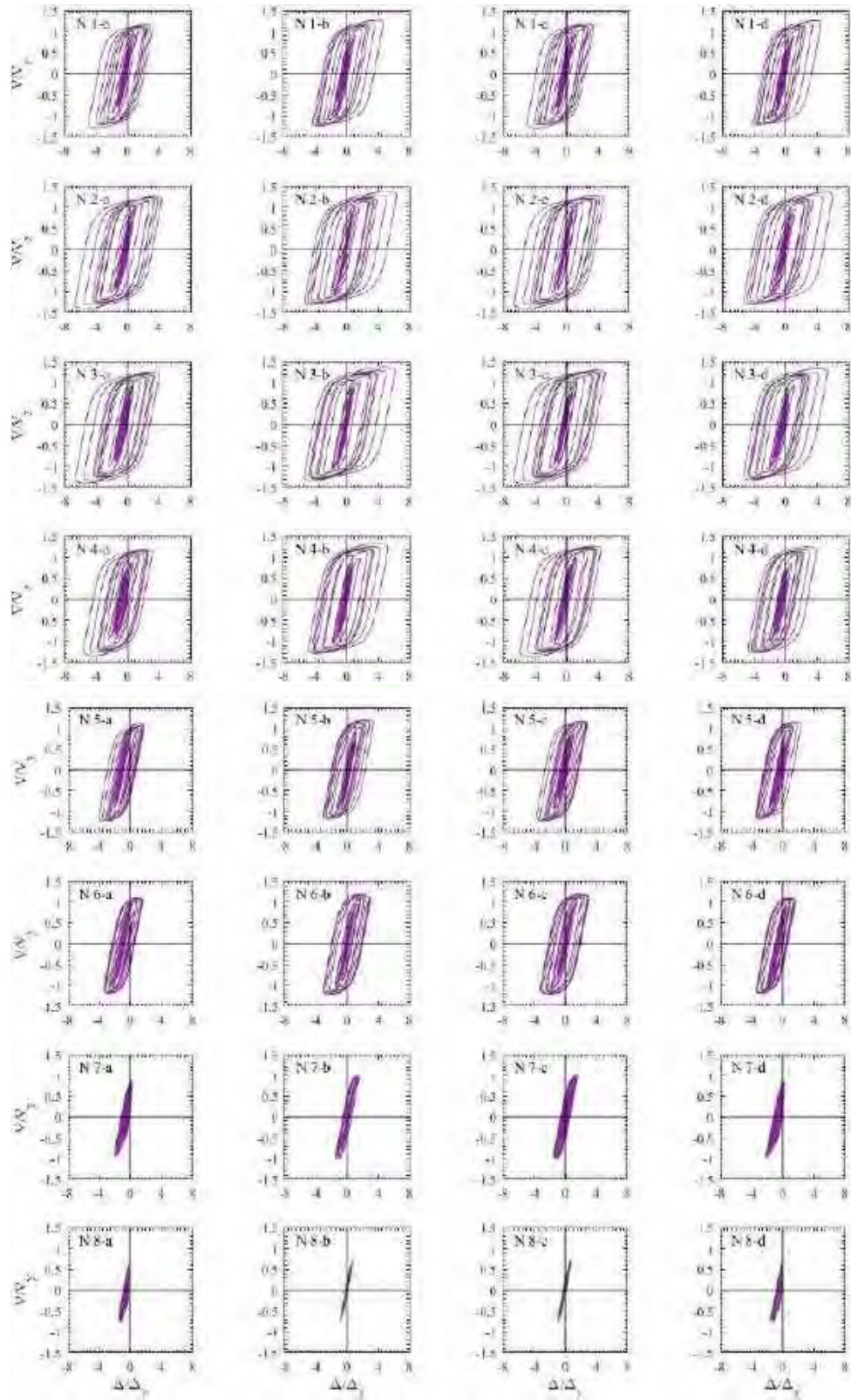


Figura F.18. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración AO24-B

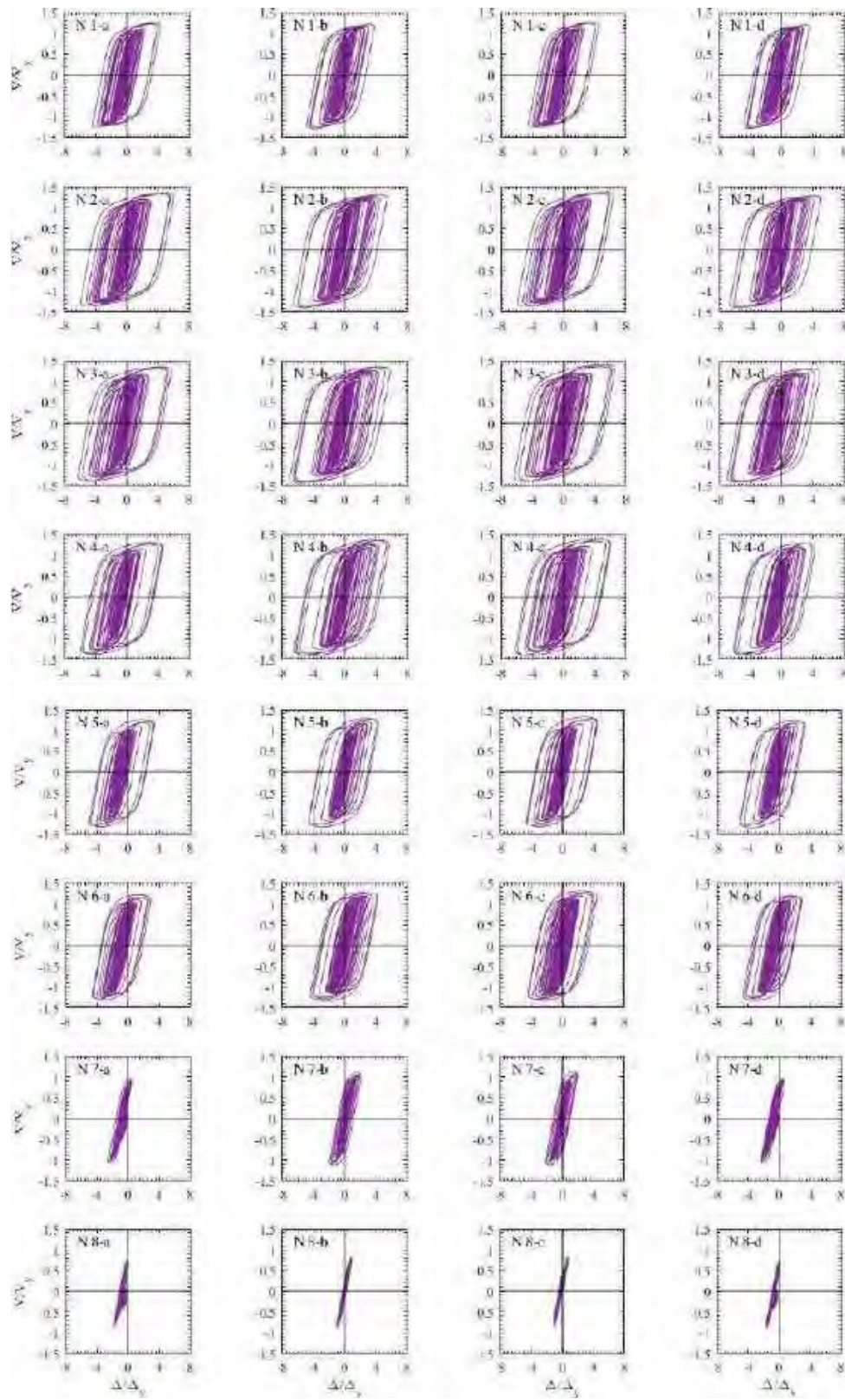


Figura F.19. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CLRT-A

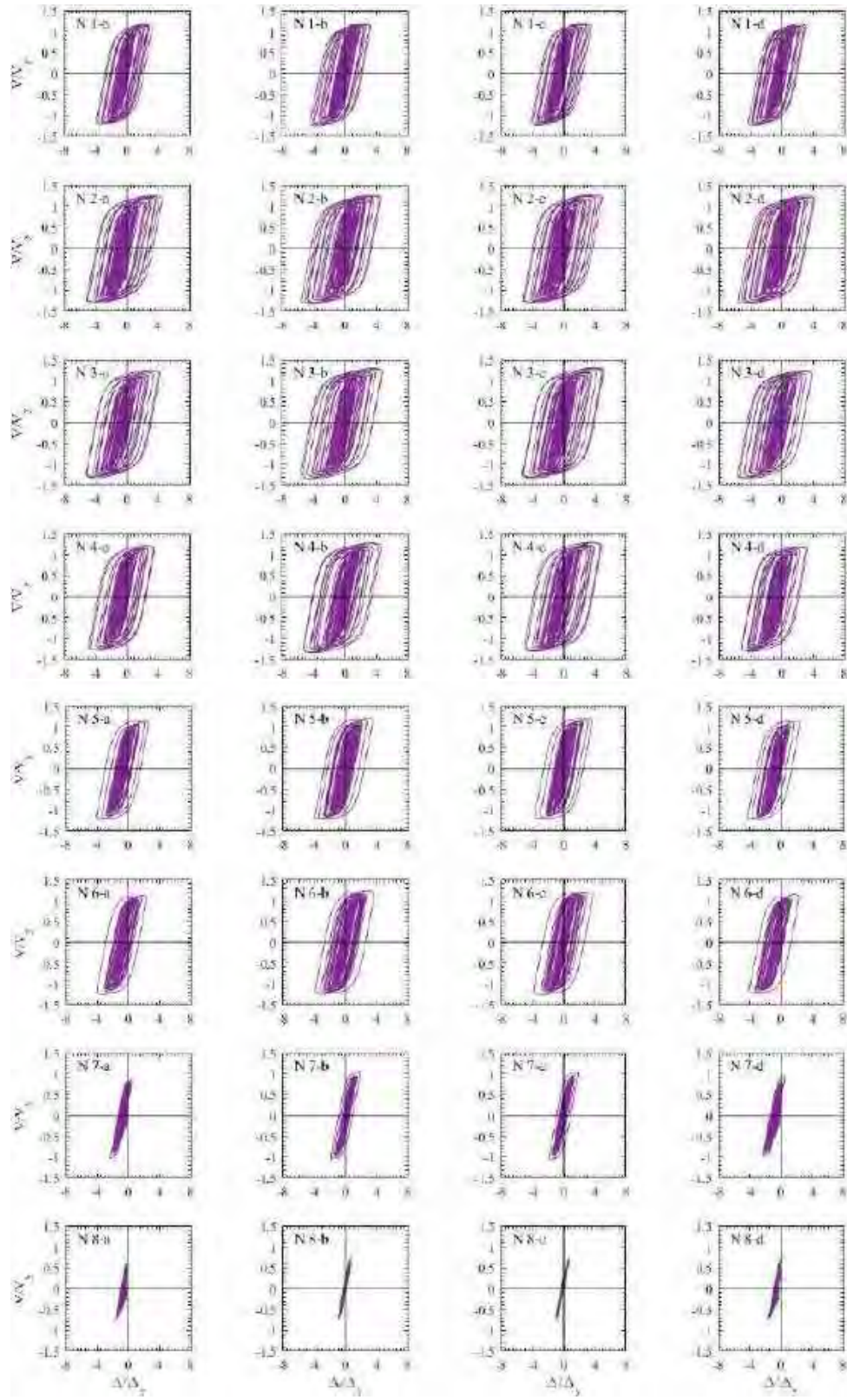


Figura F.20. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CLRT-B

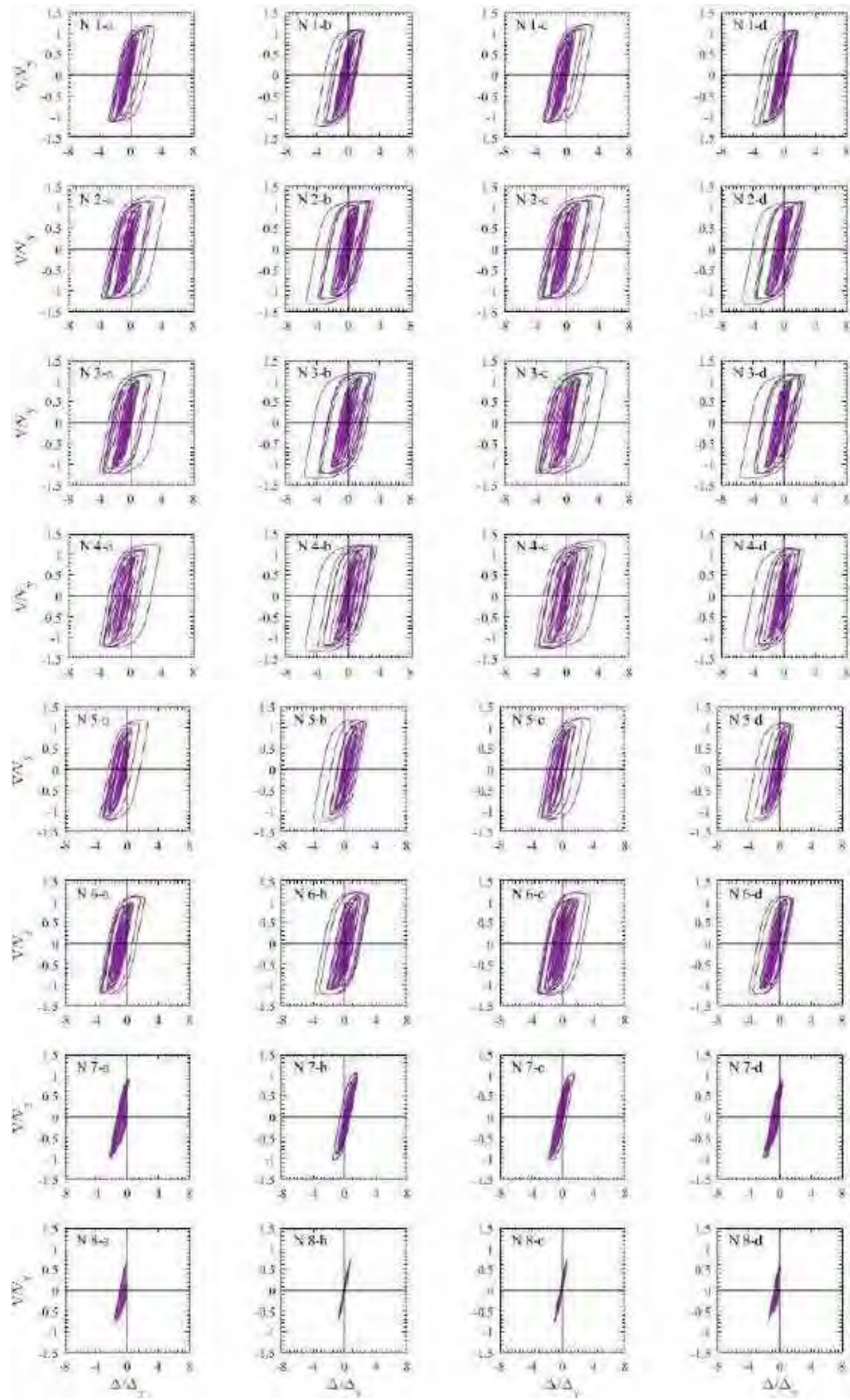


Figura F.21. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración COYS-A

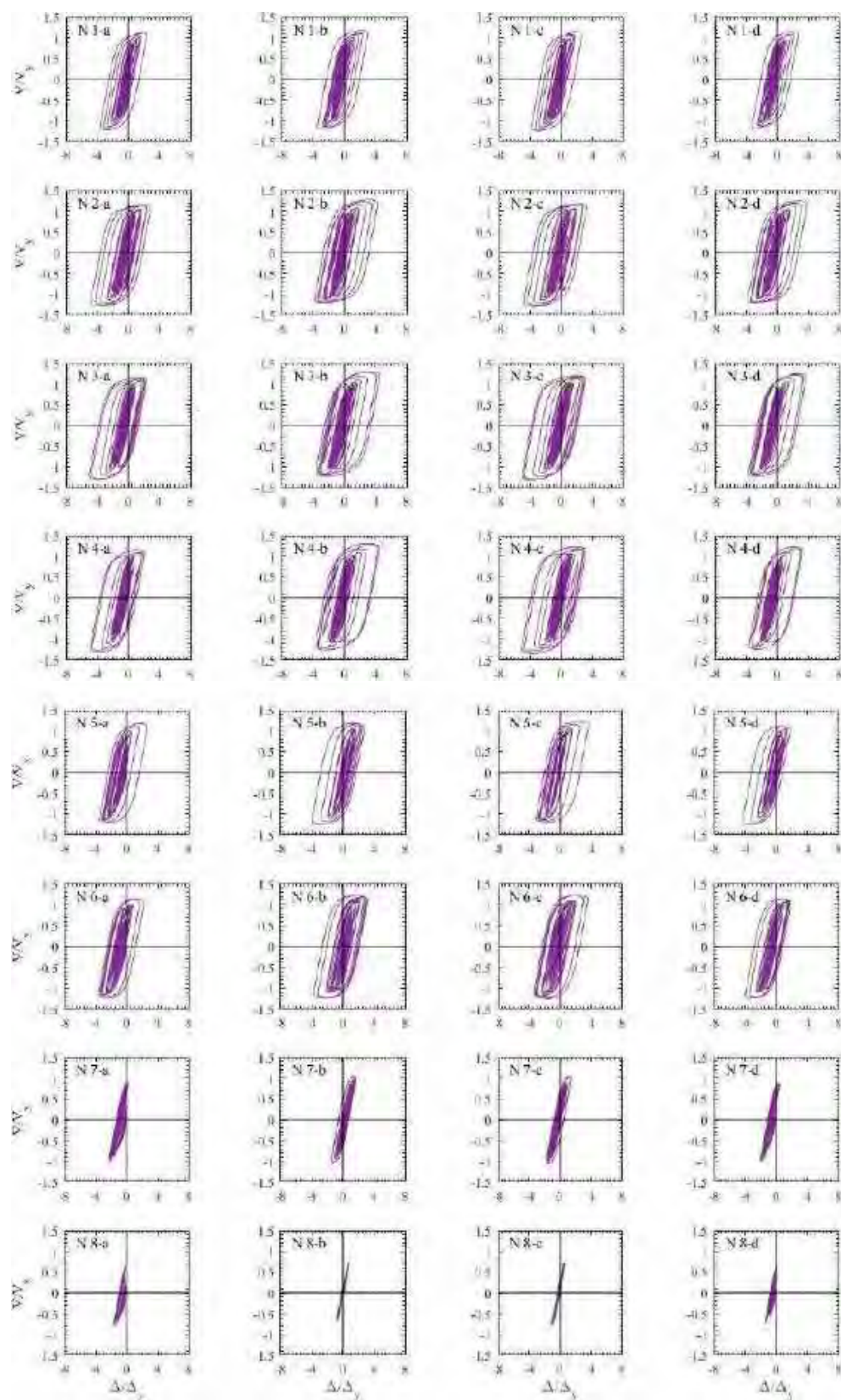


Figura F.22. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración COYS-B

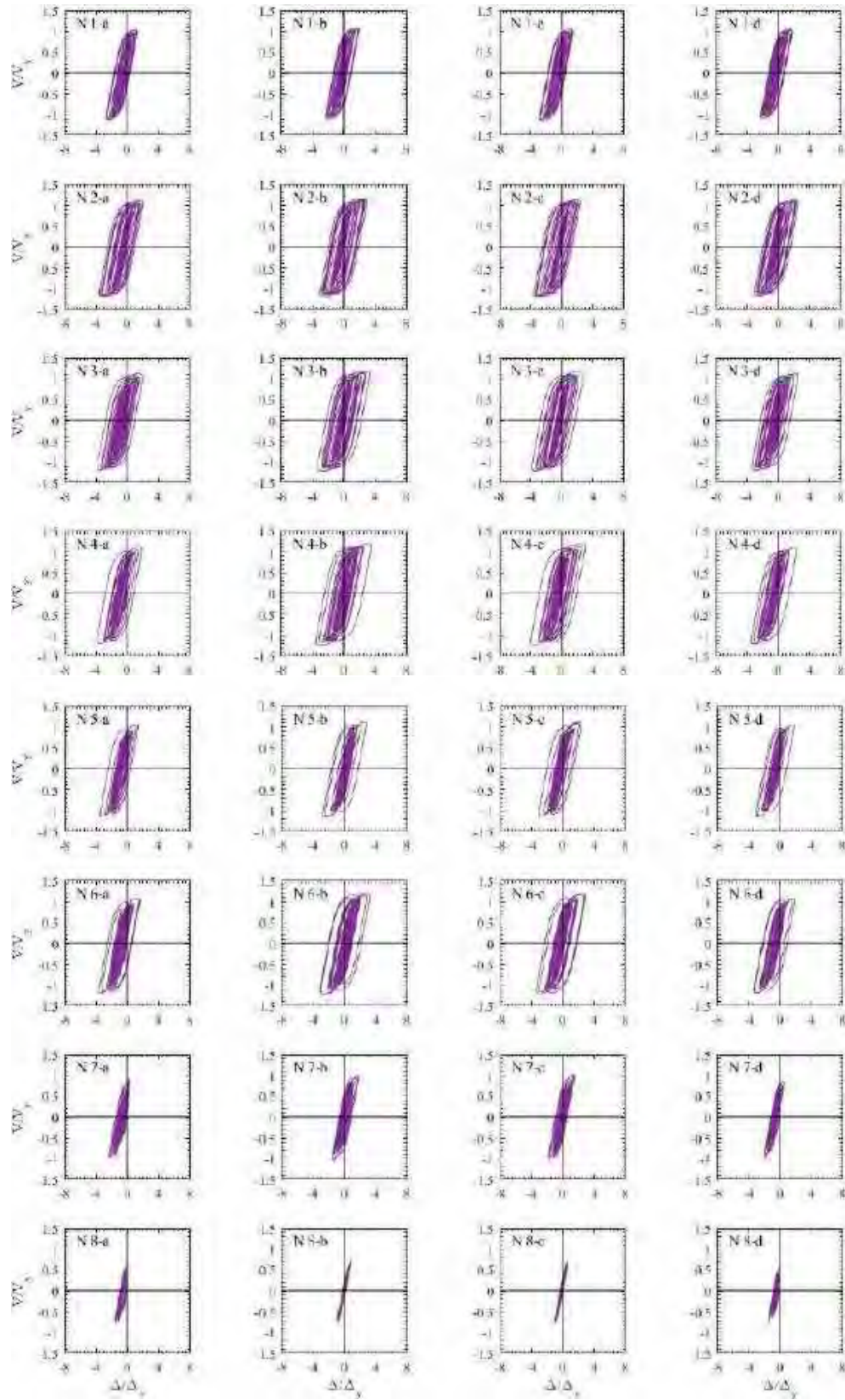


Figura F.23. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DR16-A

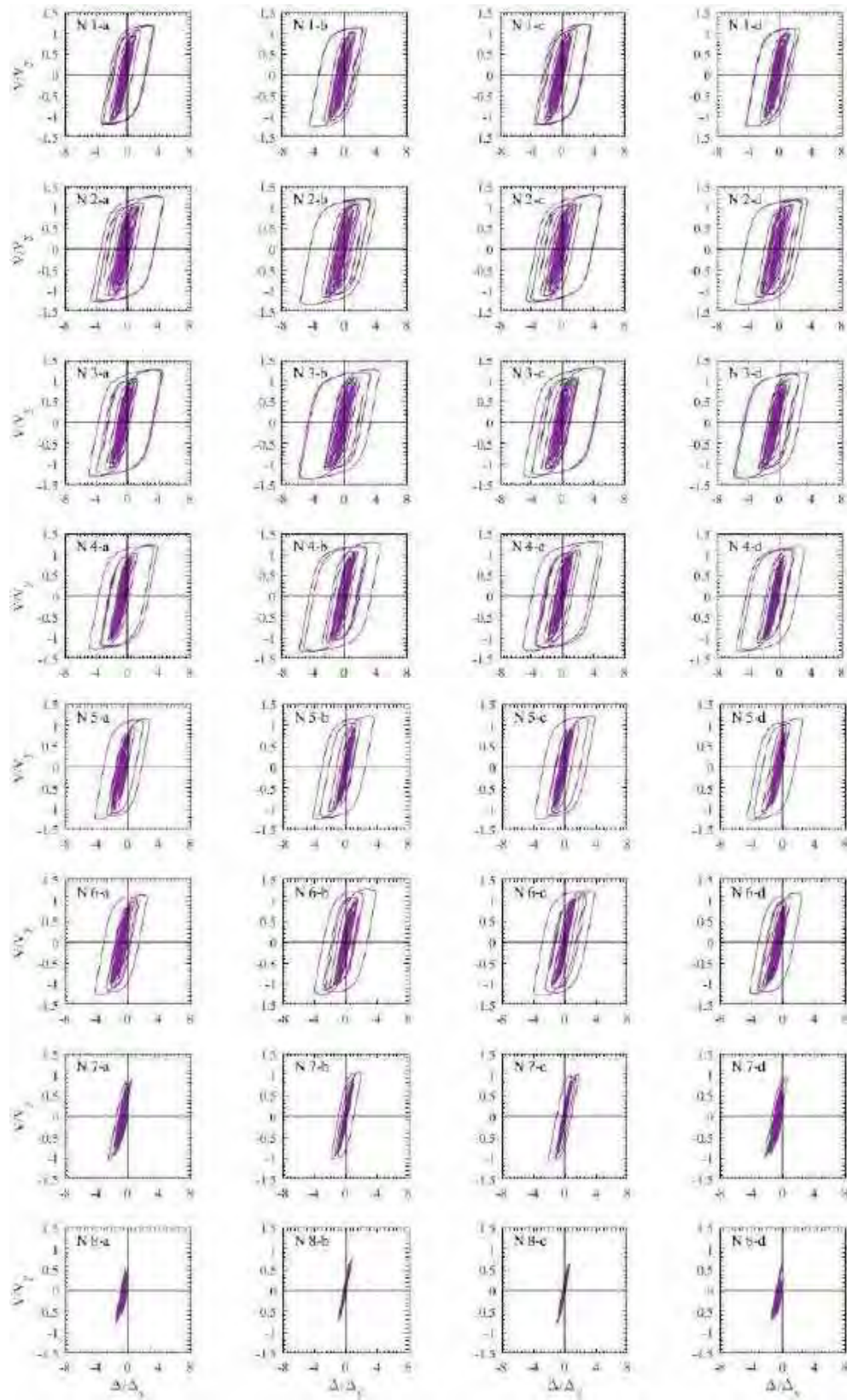


Figura F.24. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DR16-B

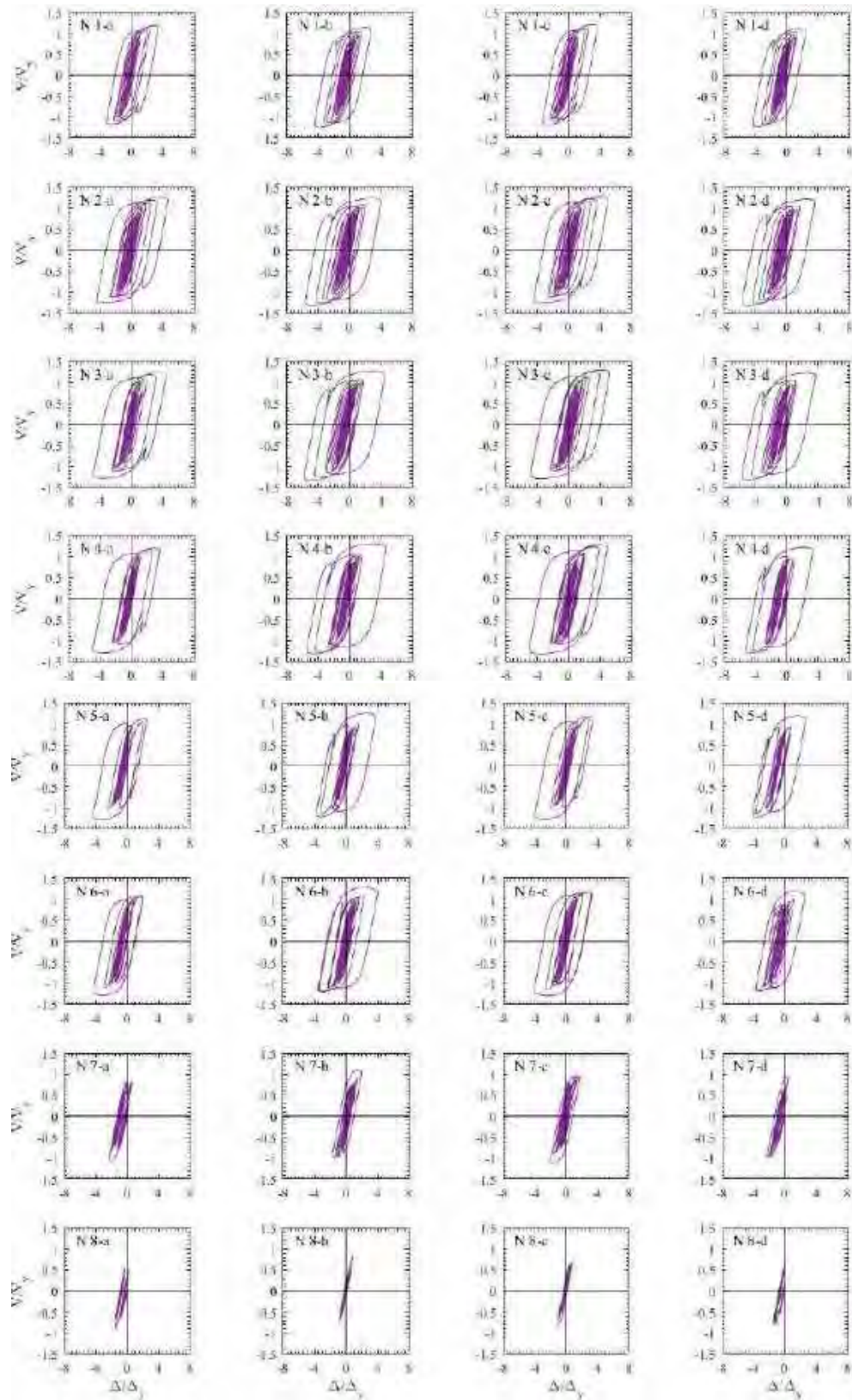


Figura F.25. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración EO30-A

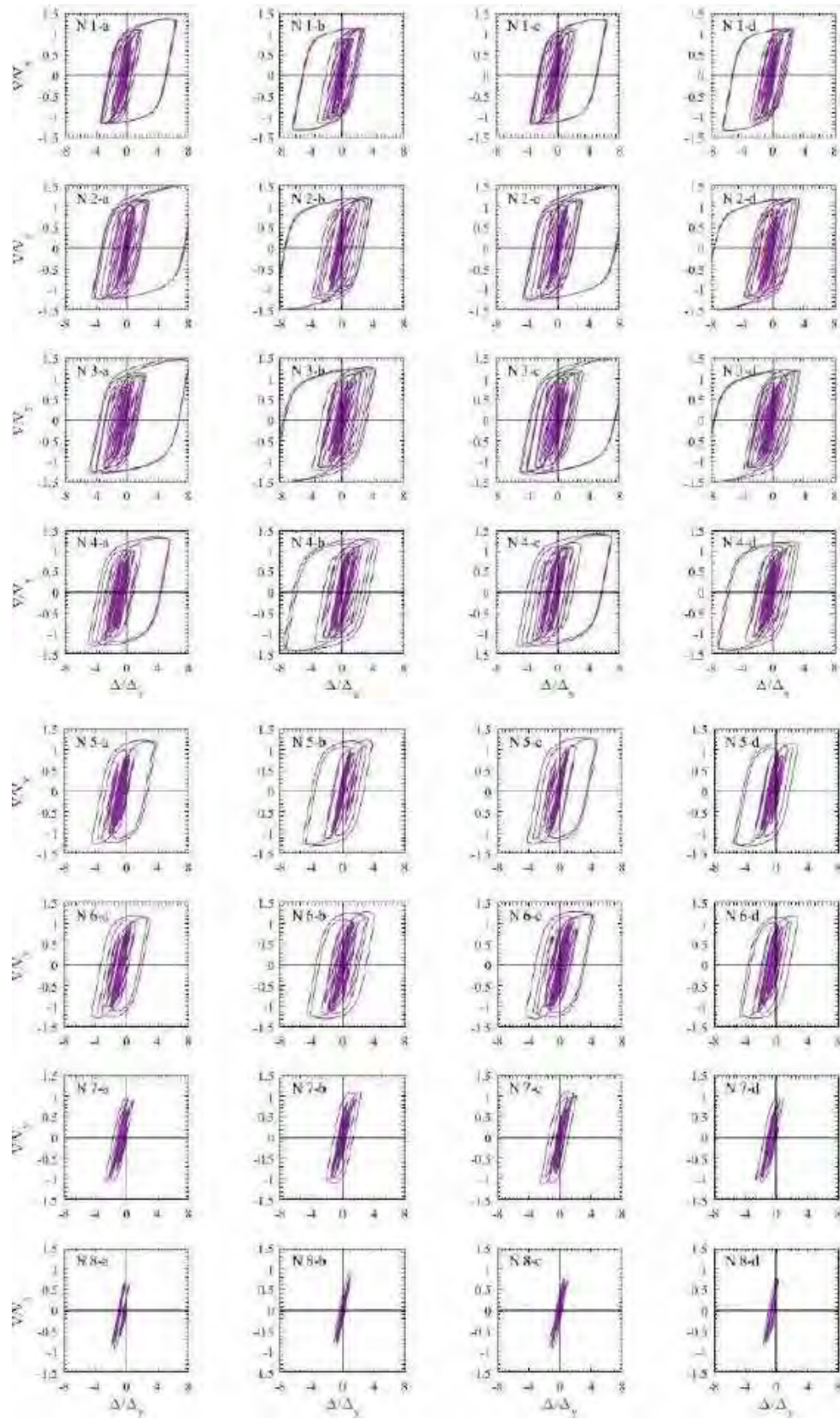


Figura F.26. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración EO30-B

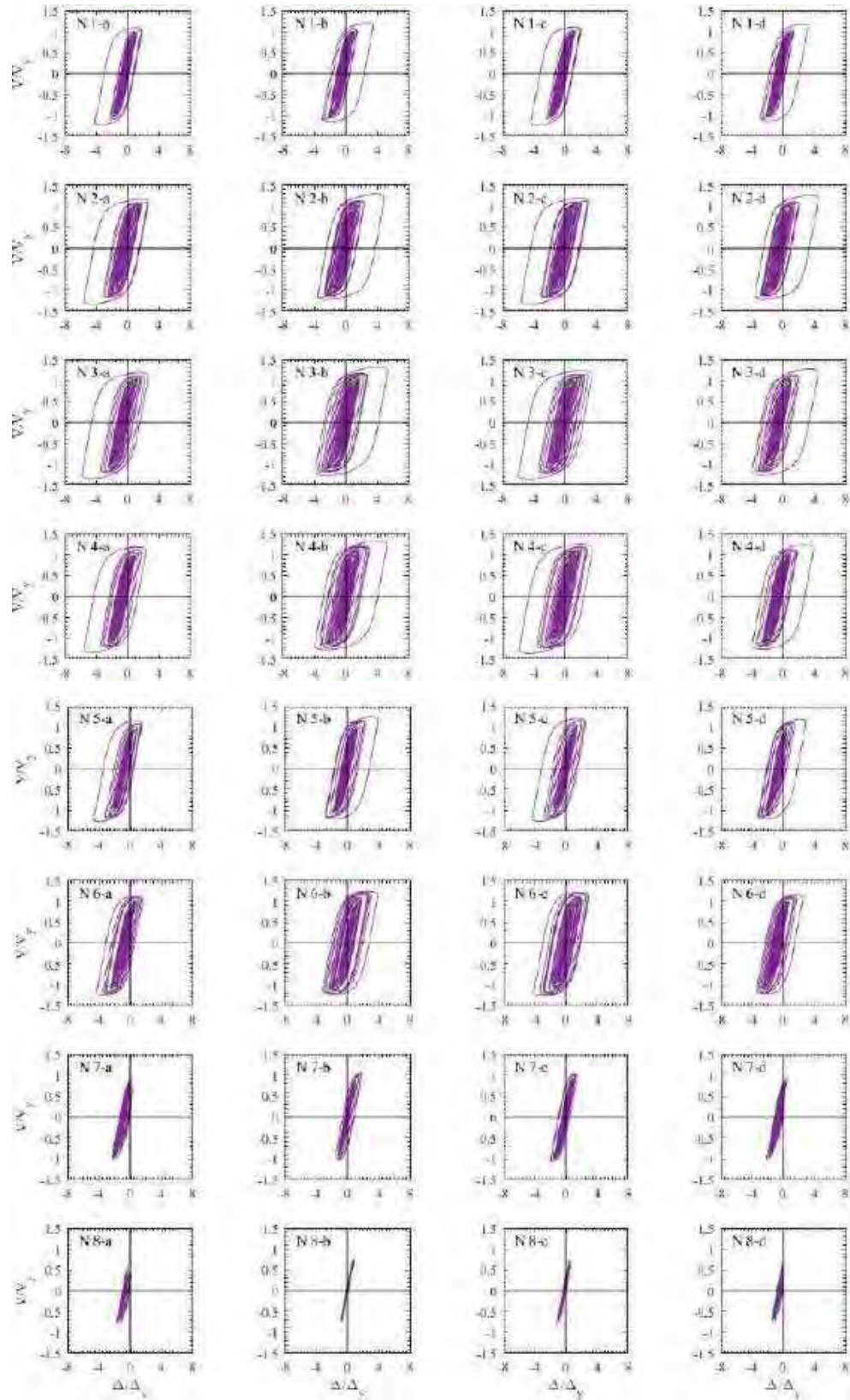


Figura F.27. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración GR27-A

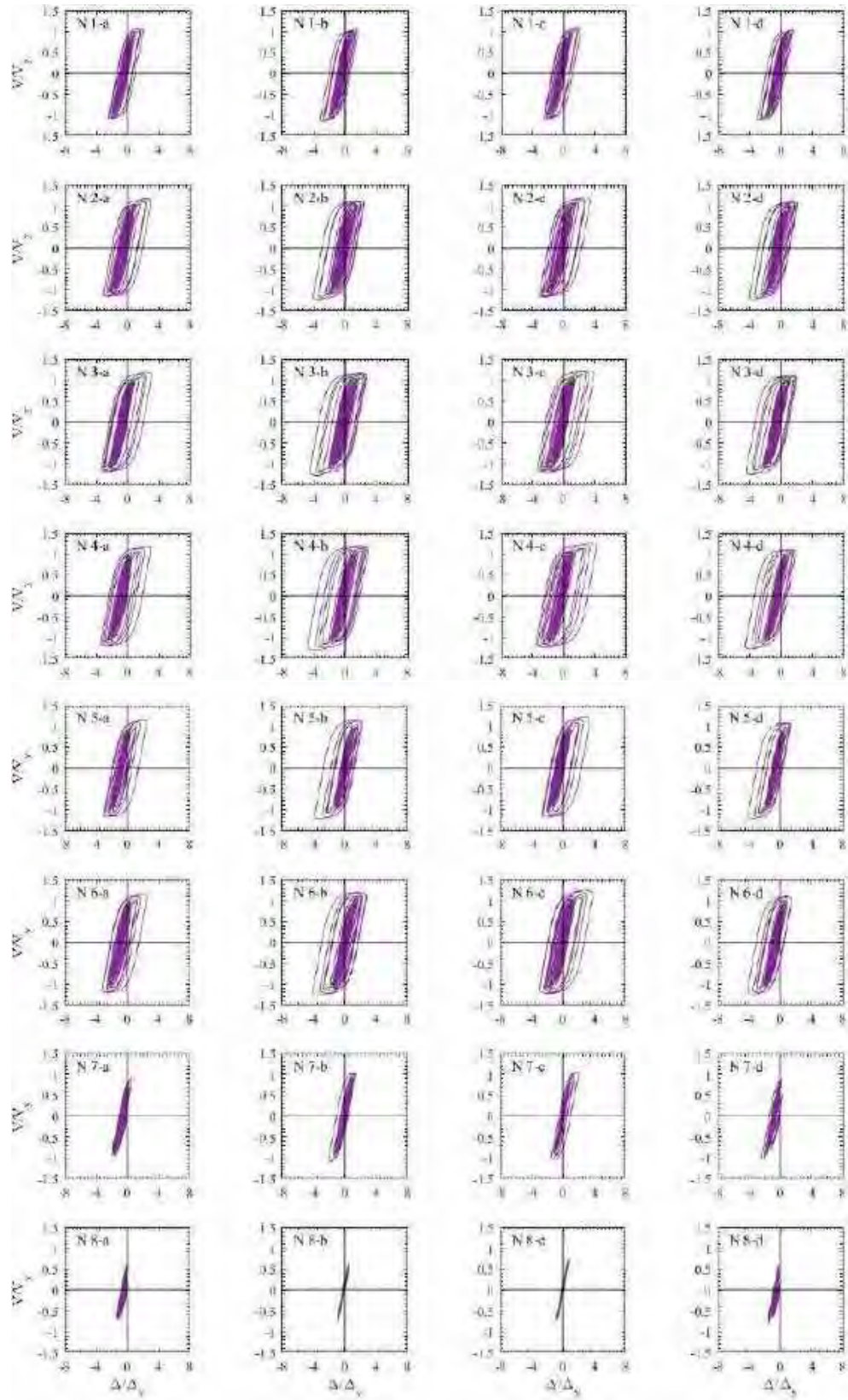


Figura F.28. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración GR27-B

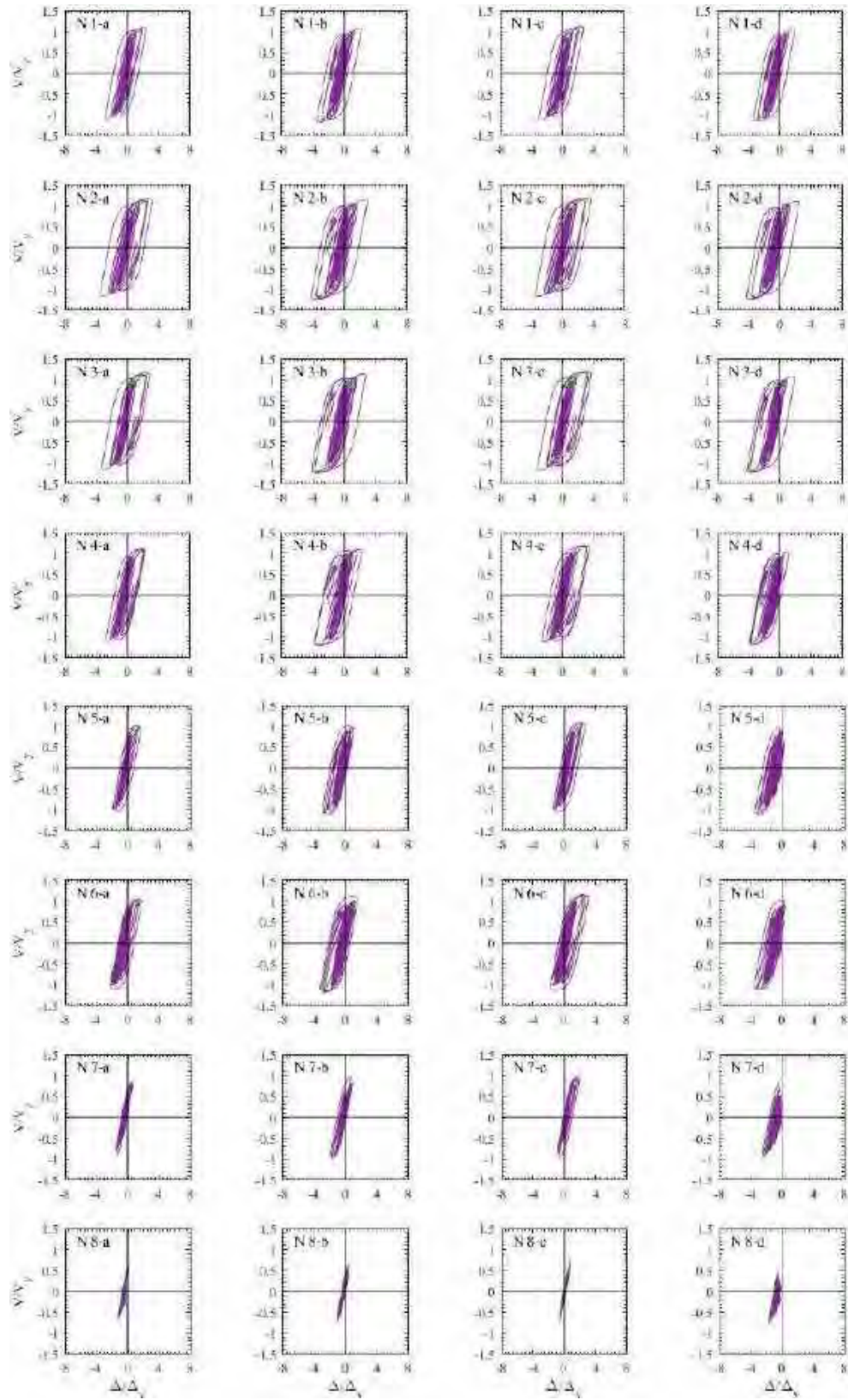


Figura F.29. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SXVI-A (1985)

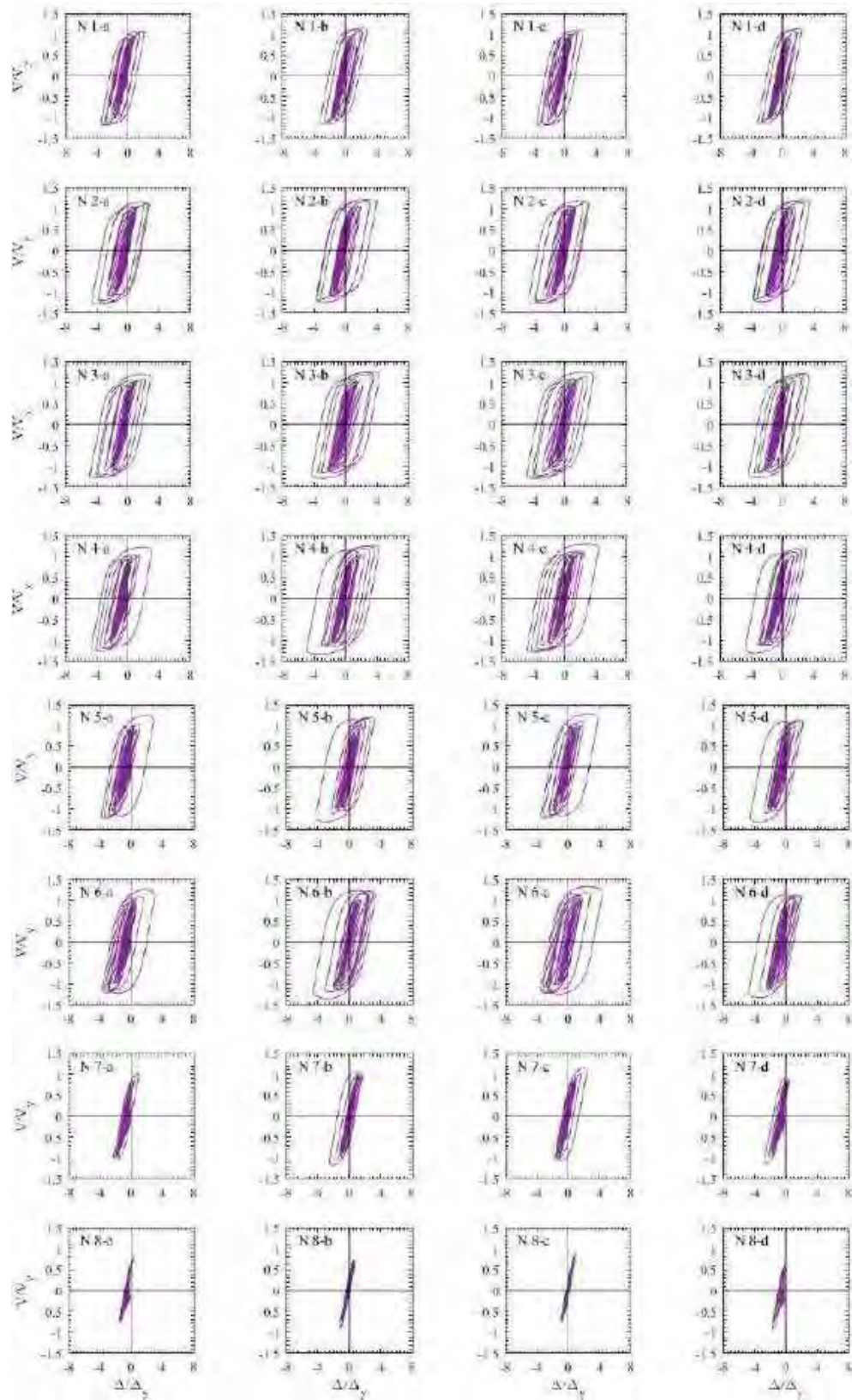


Figura F.30. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SXVI -B (1985)

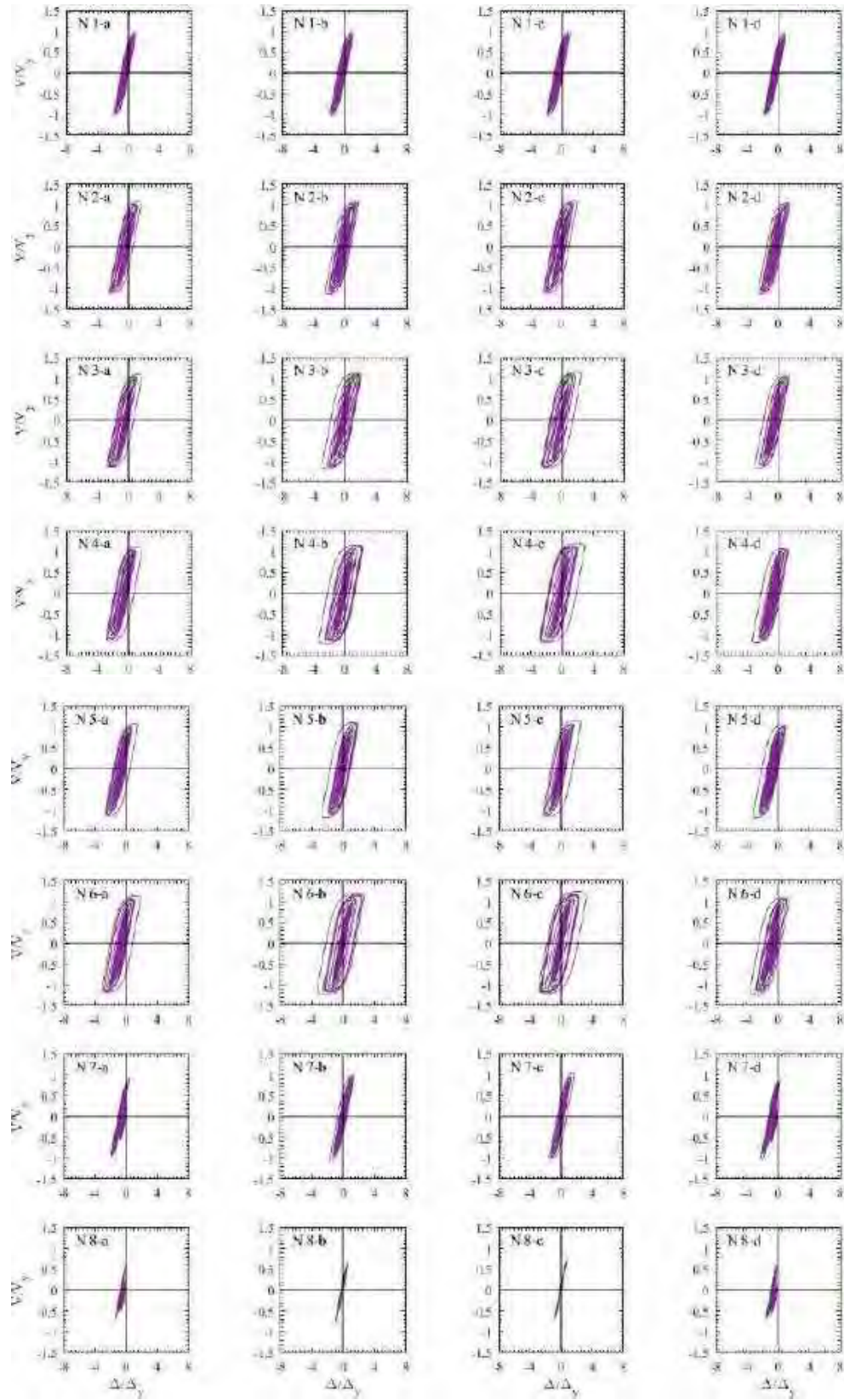


Figura F.31. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración GR27-A (2017)

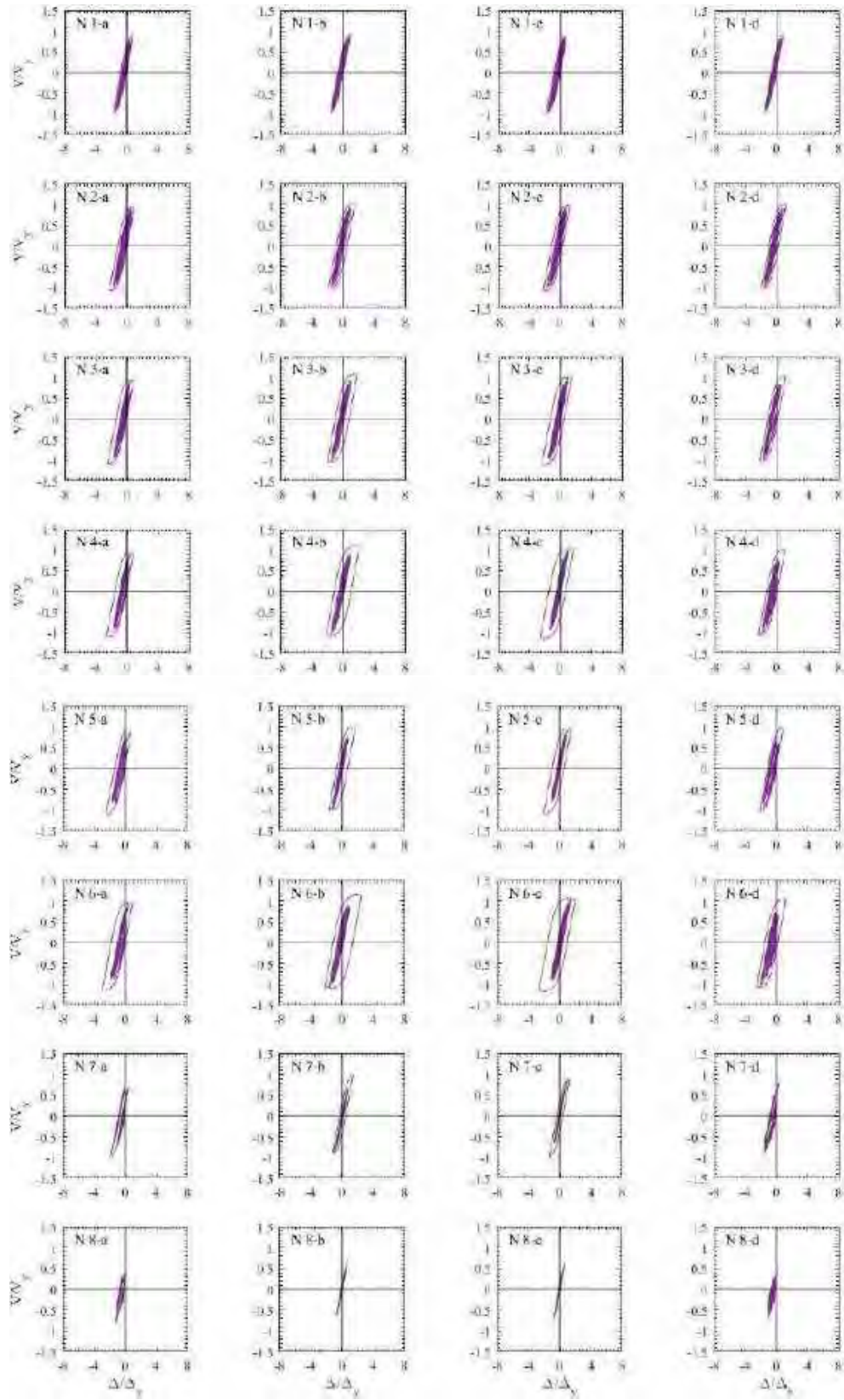


Figura F.32. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.1.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x

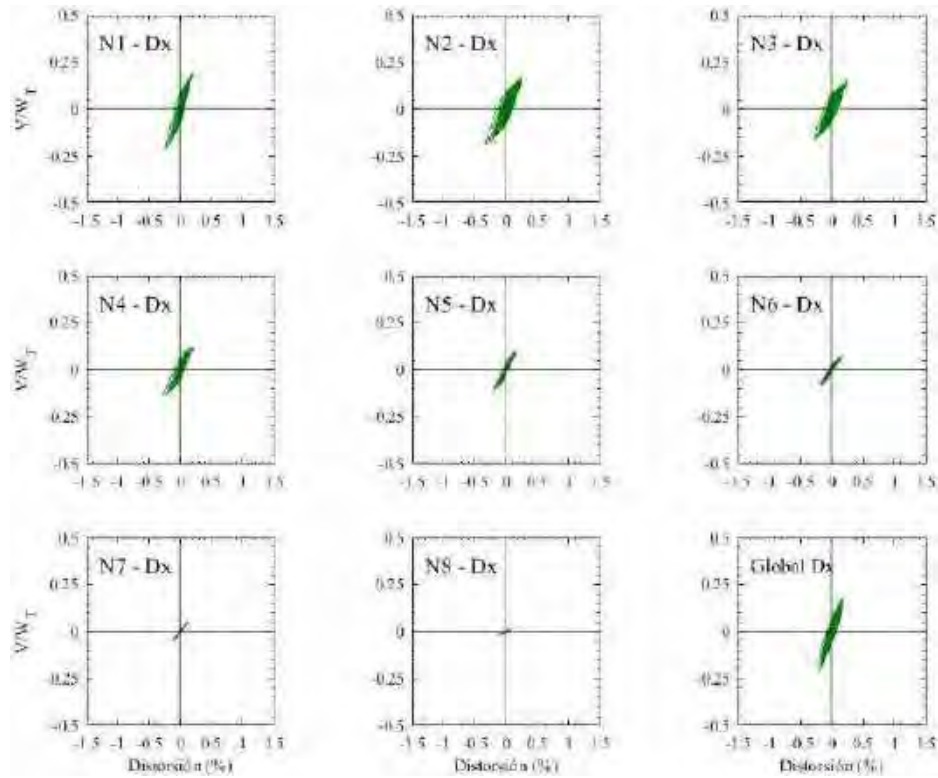


Figura F.33. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración AO24-A

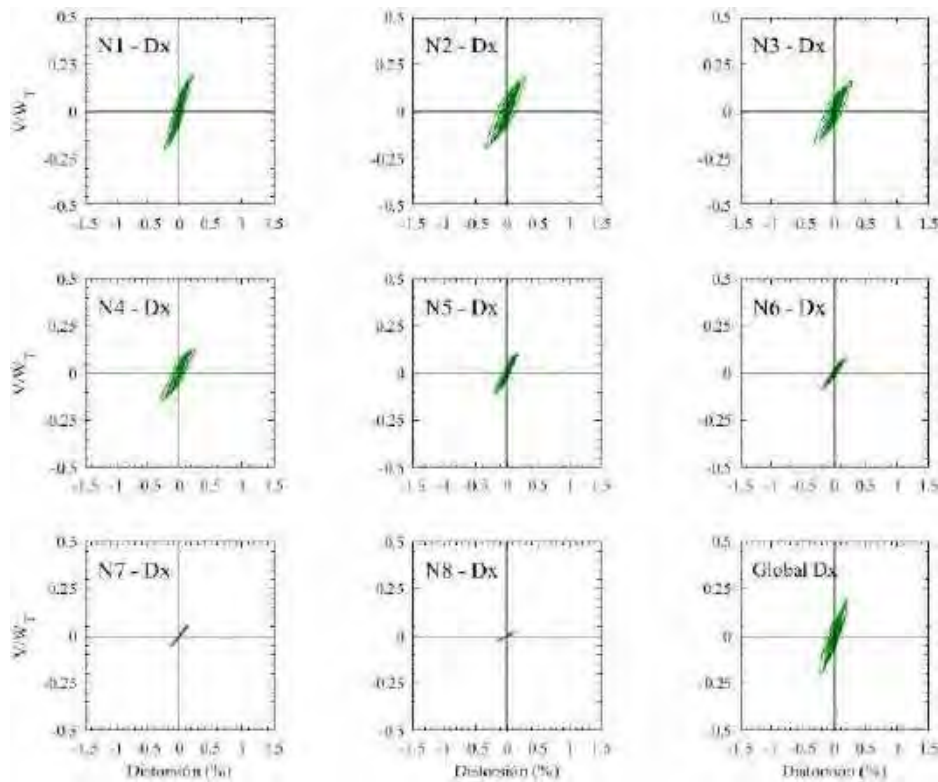


Figura F.34. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración AO24-B

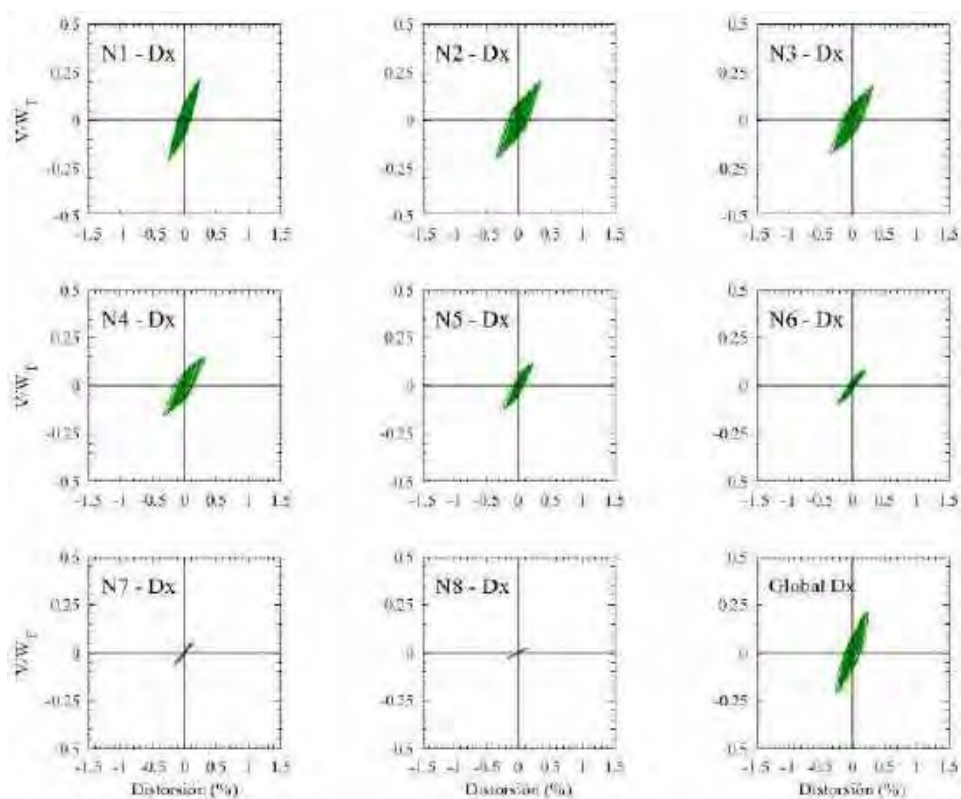


Figura F.35. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración CLRT-A

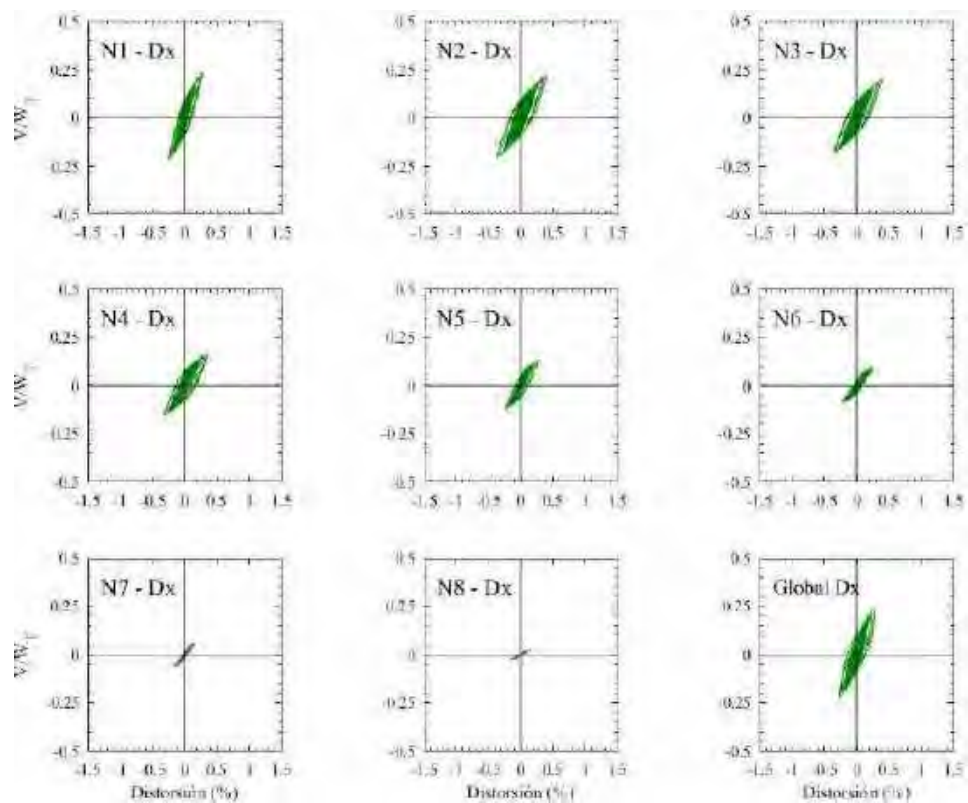


Figura F.36. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración CLRT-B

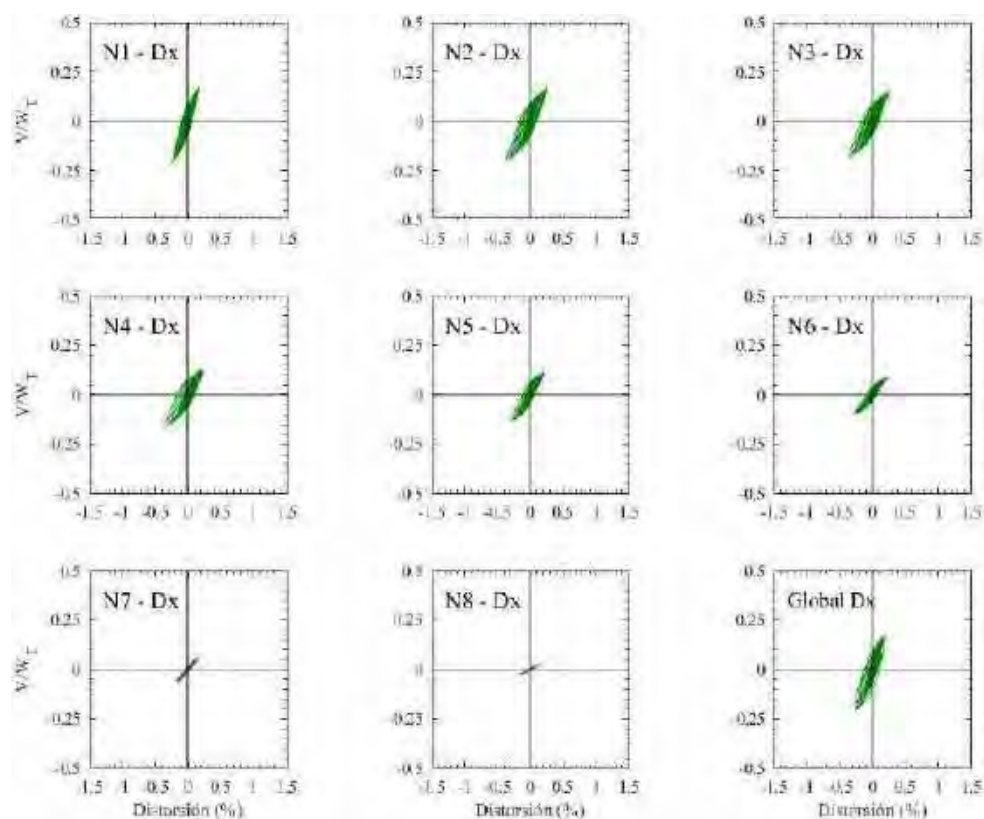


Figura F.37. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración COYS-A

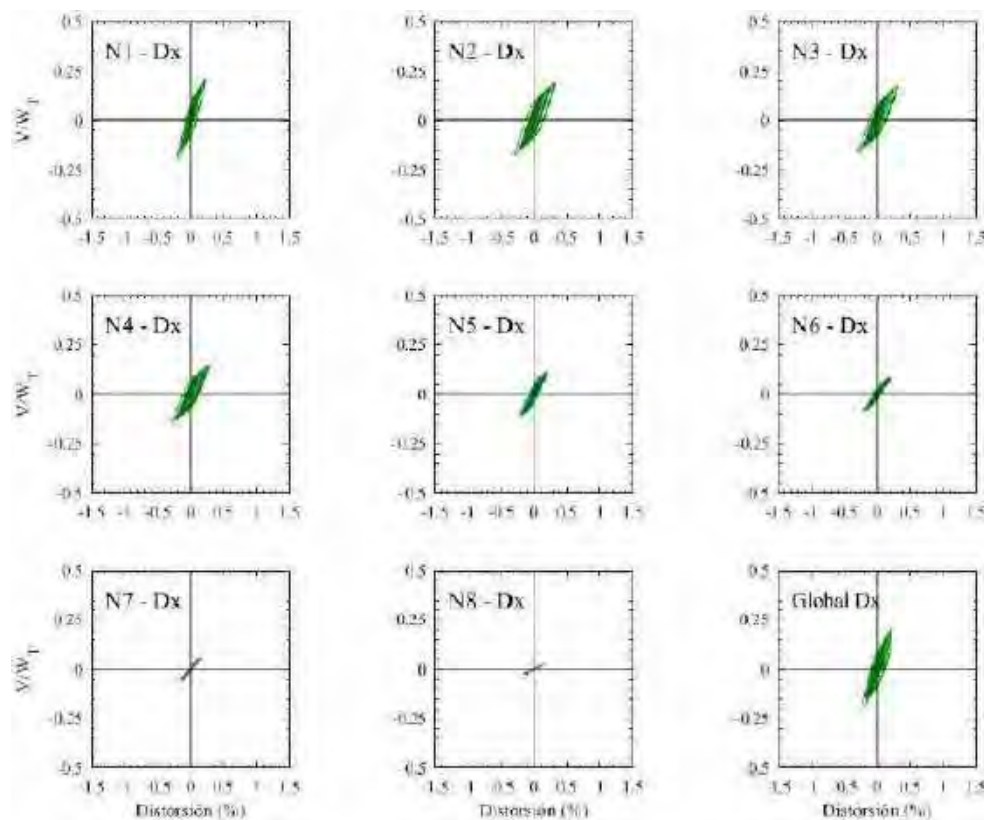


Figura F.38. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración COYS-B

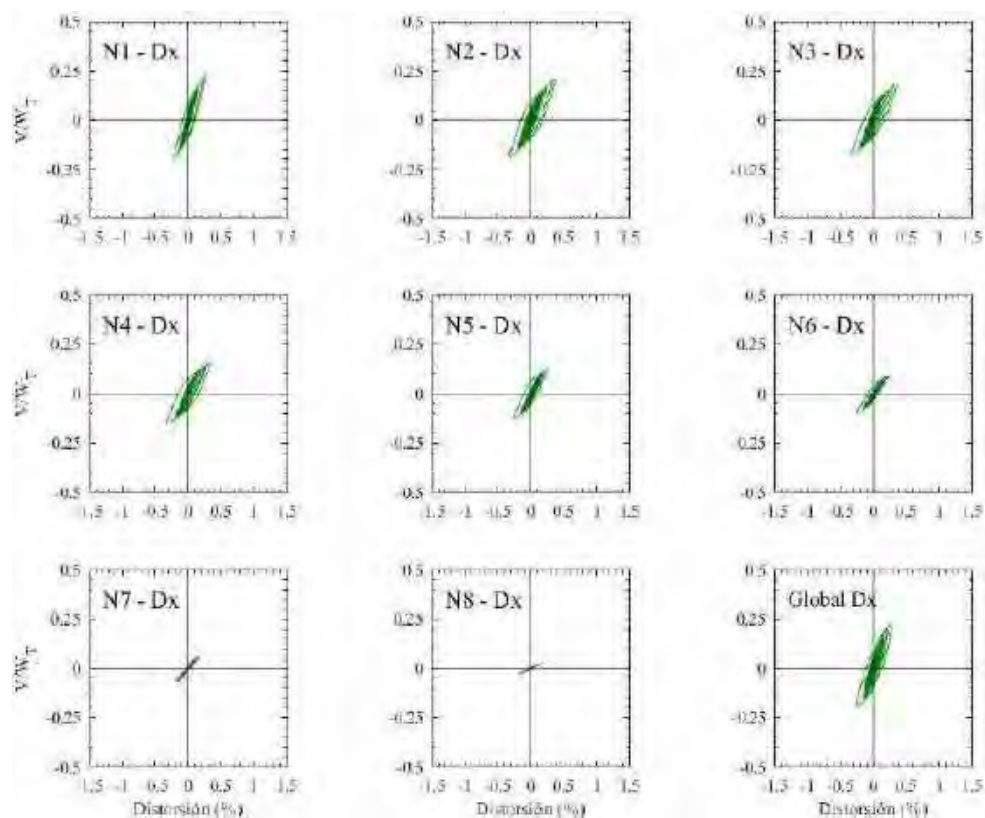


Figura F.39. Ciclos de histéresis de los entrapisos en dirección x, registros de aceleración DR16-A

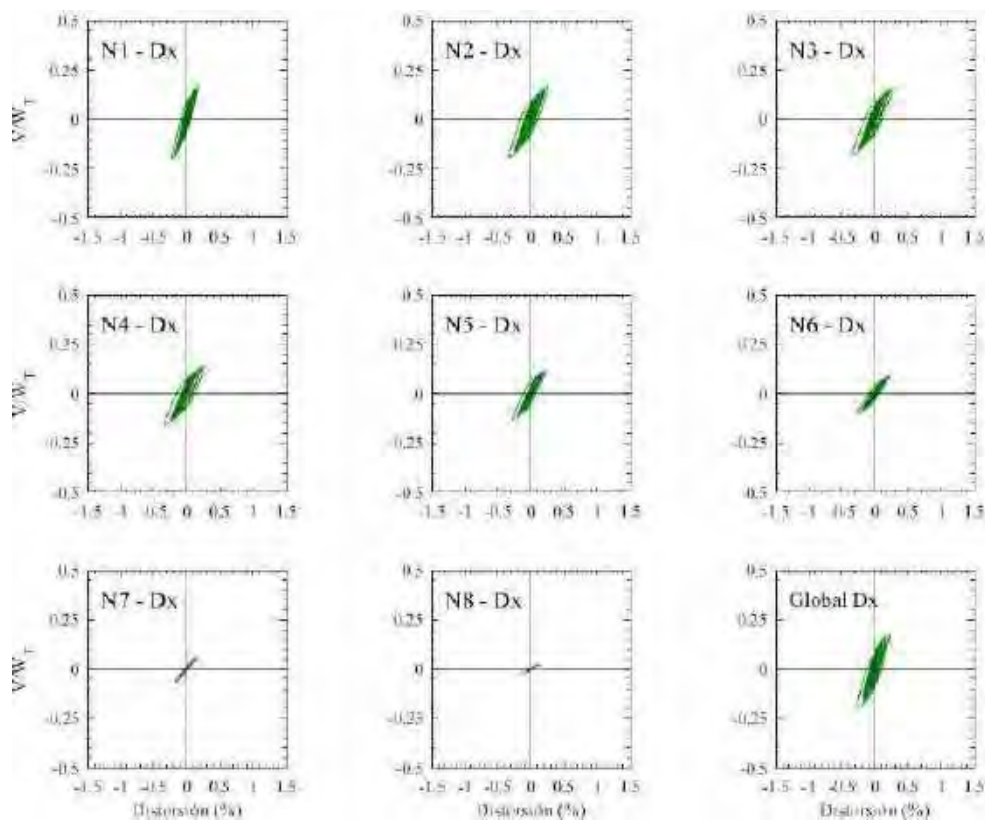


Figura F.40. Ciclos de histéresis de los entrapisos en dirección x, registros de aceleración DR16-B

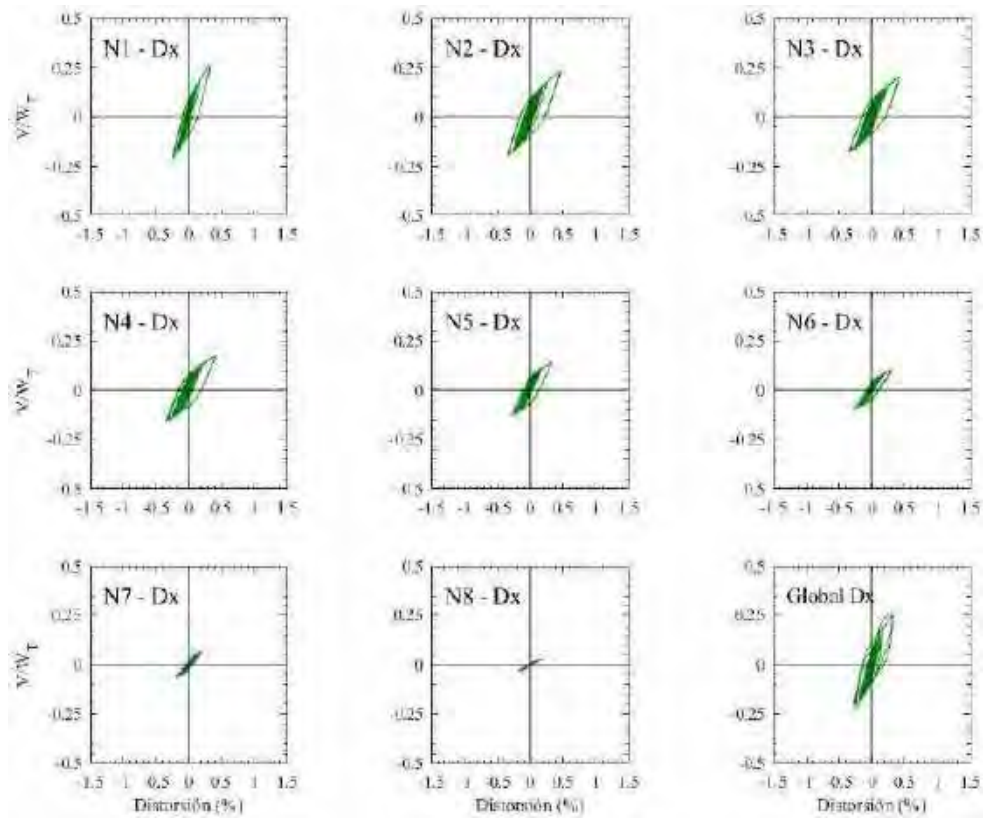


Figura F.41. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración EO30-A

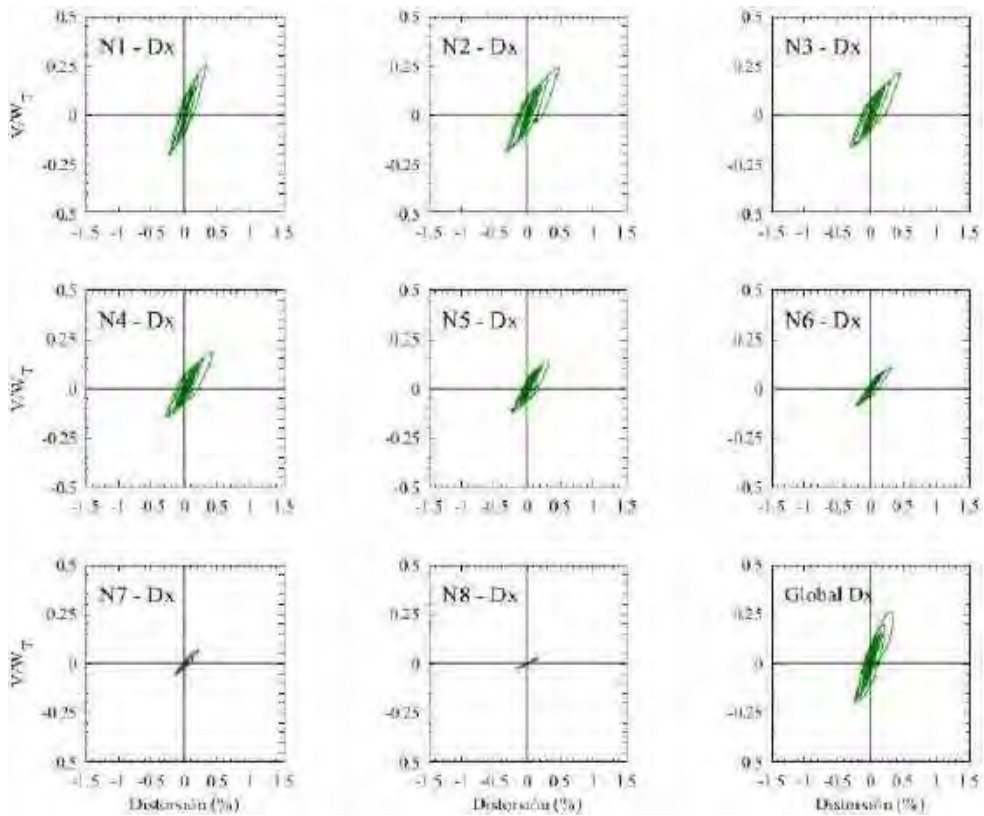


Figura F.42. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración EO30-B

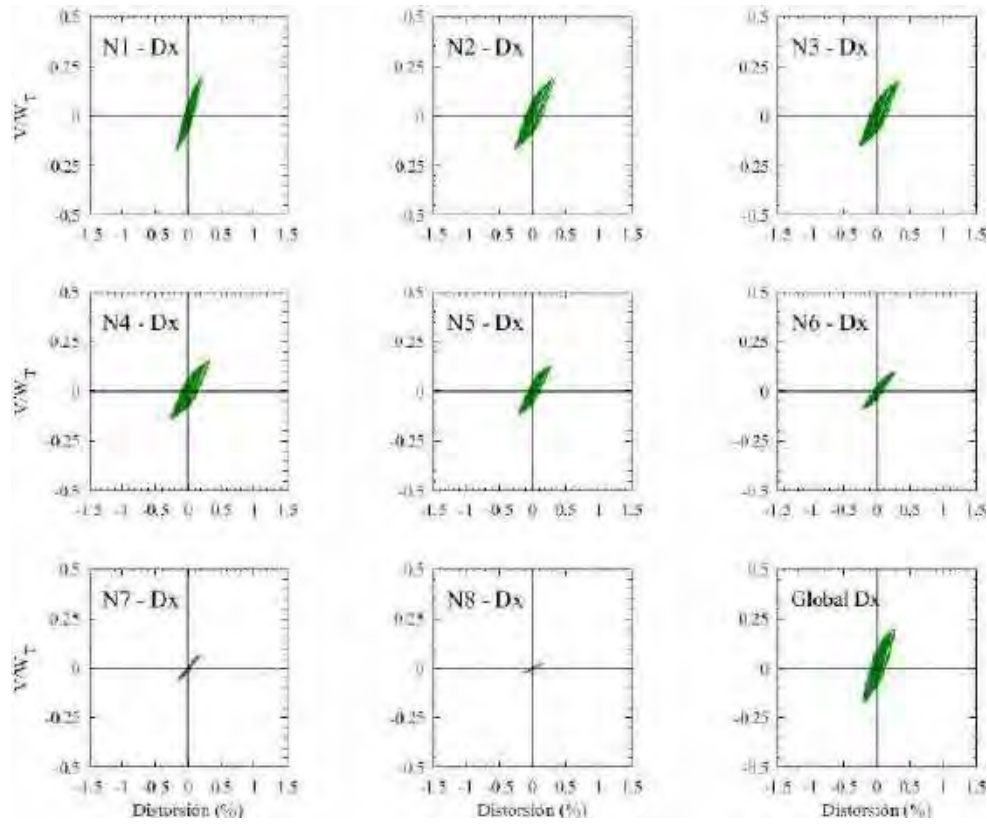


Figura F.43. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración GR27-A

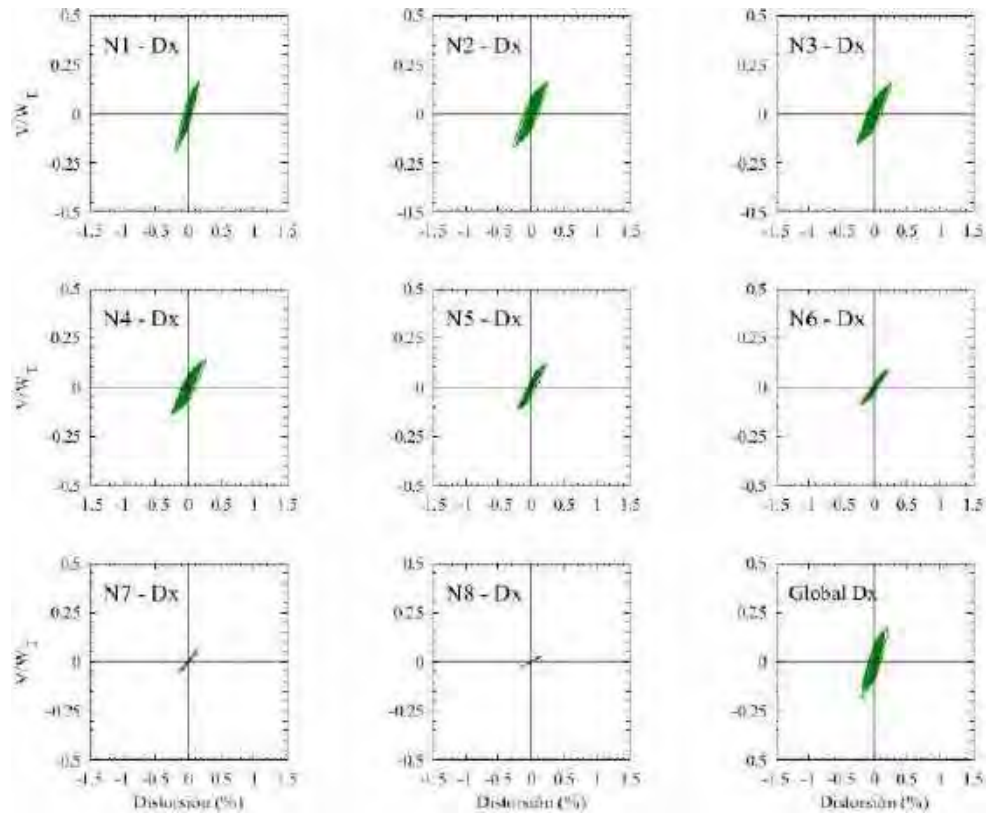


Figura F.44. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración GR27-B

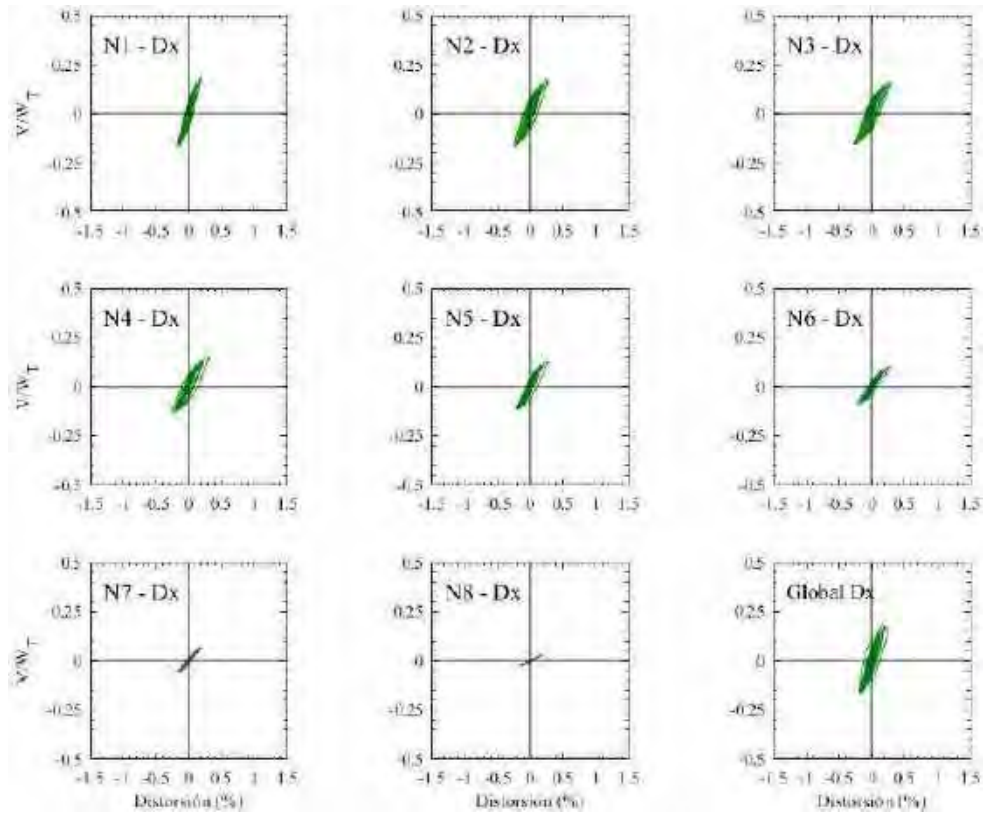


Figura F.45. Ciclos de histéresis de los entrapisos en dirección x, registros de aceleración SXVI-A (1985)

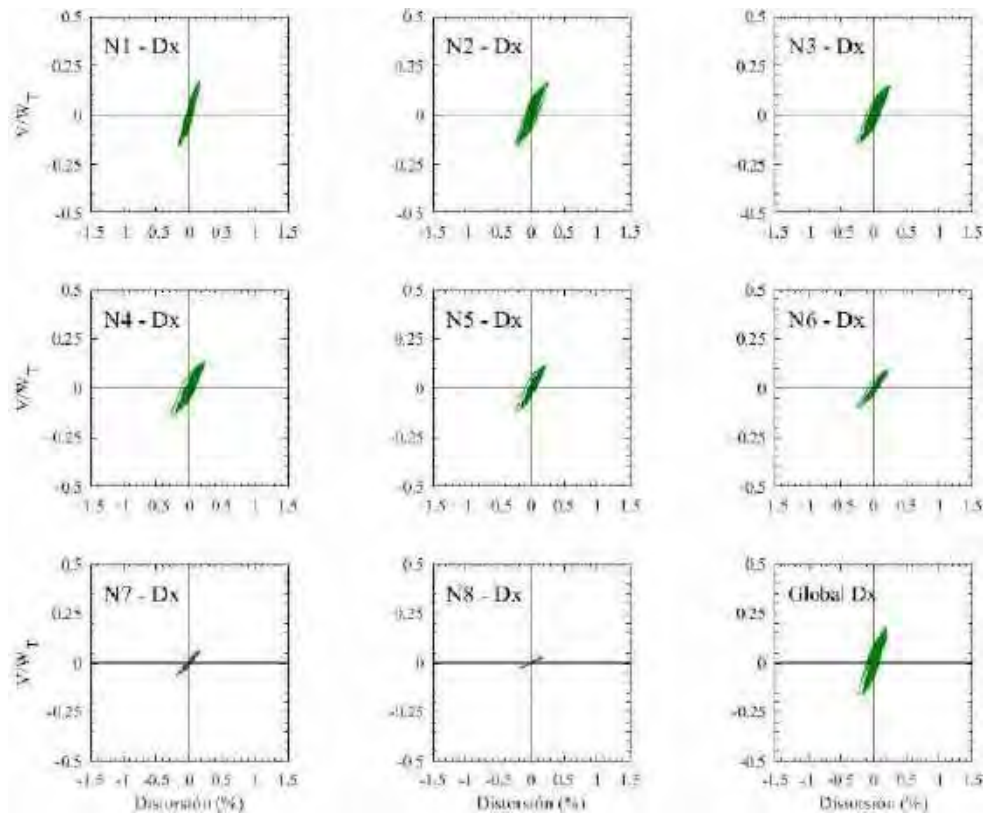


Figura F.46. Ciclos de histéresis de los entrapisos en dirección x, registros de aceleración SXVI-B (1985)

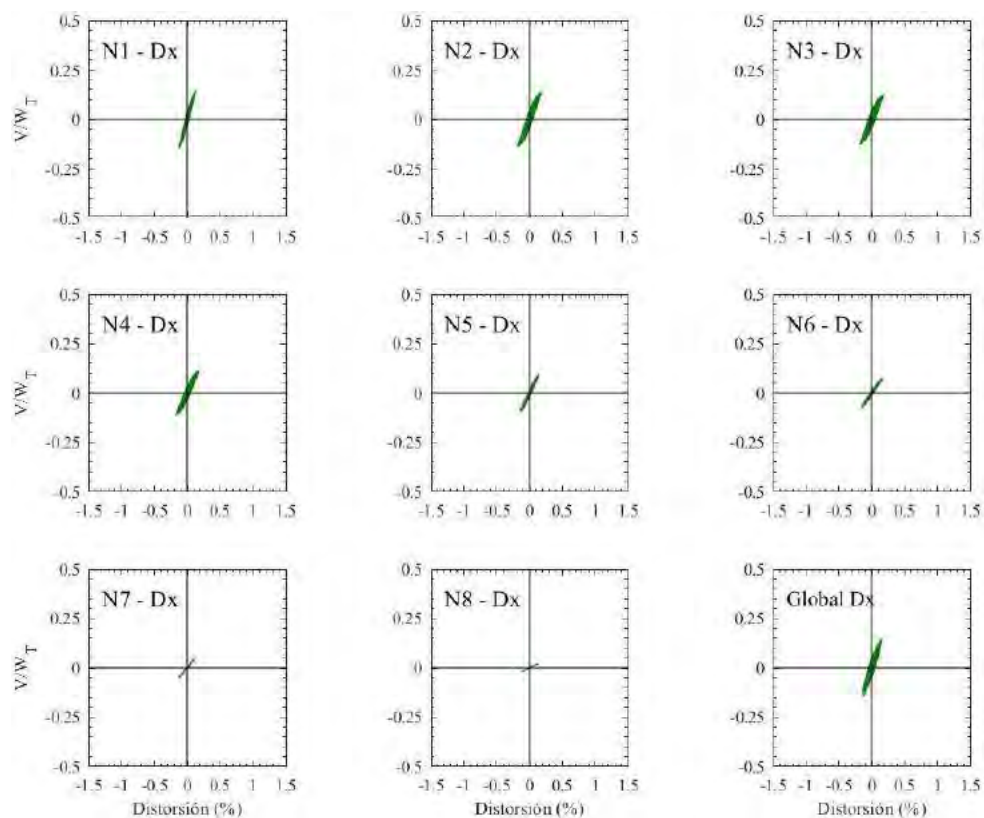


Figura F.47. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración GR27-A (2017)

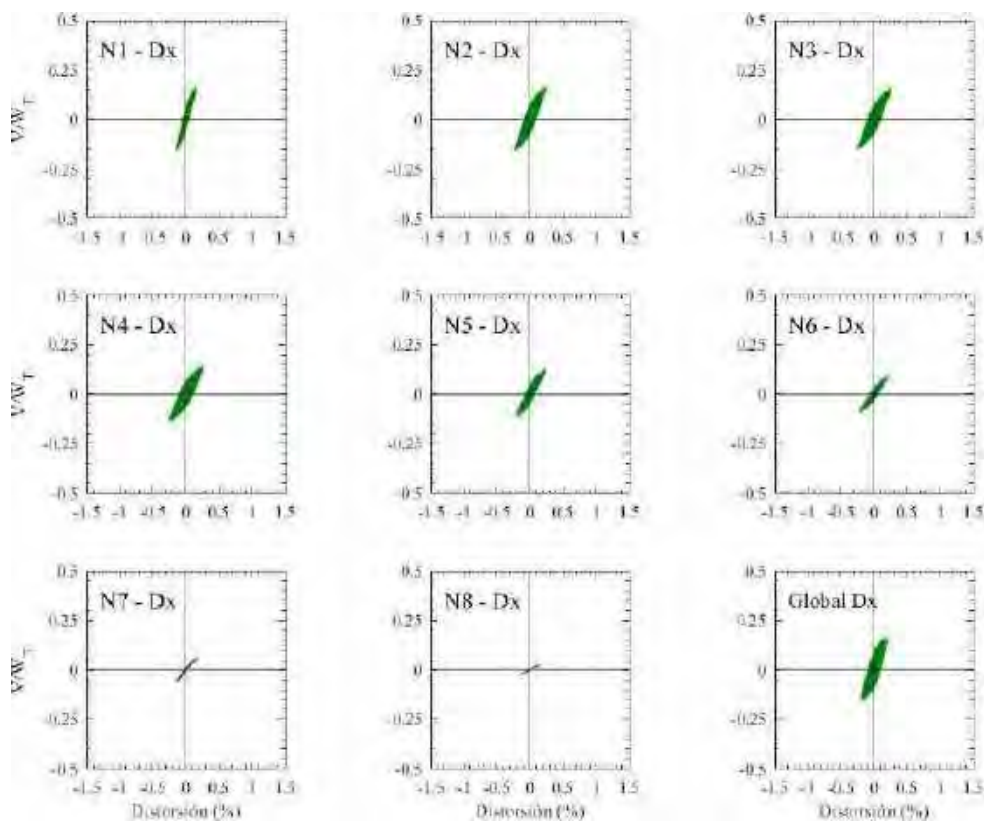


Figura F.48. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración GR27-B (2017)

F.1.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y

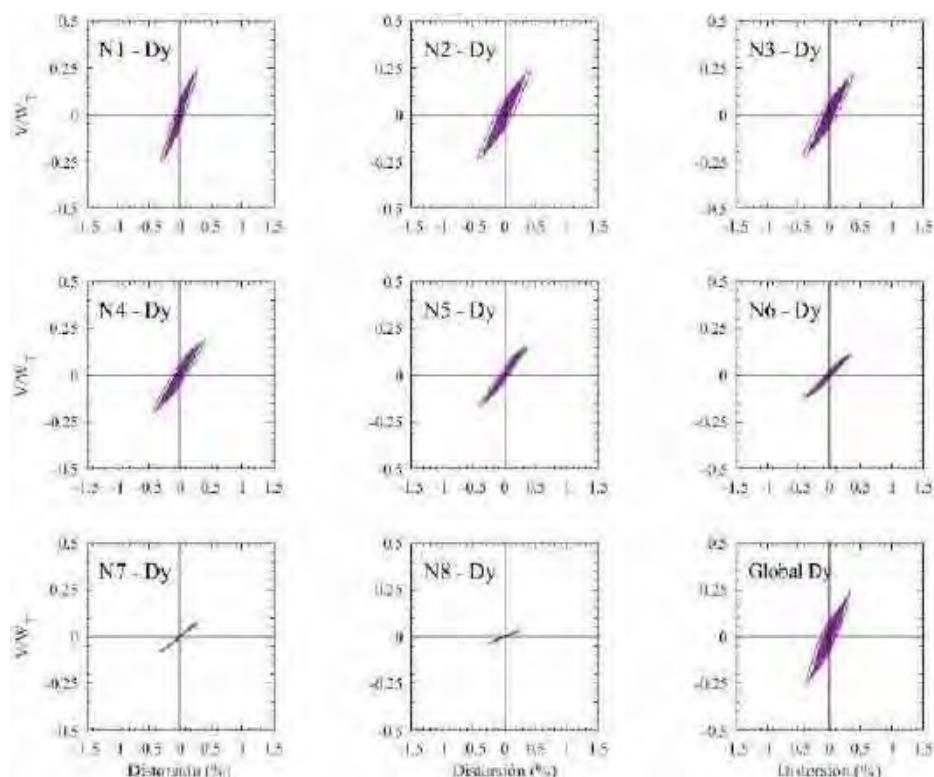


Figura F.49. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración AO24-A

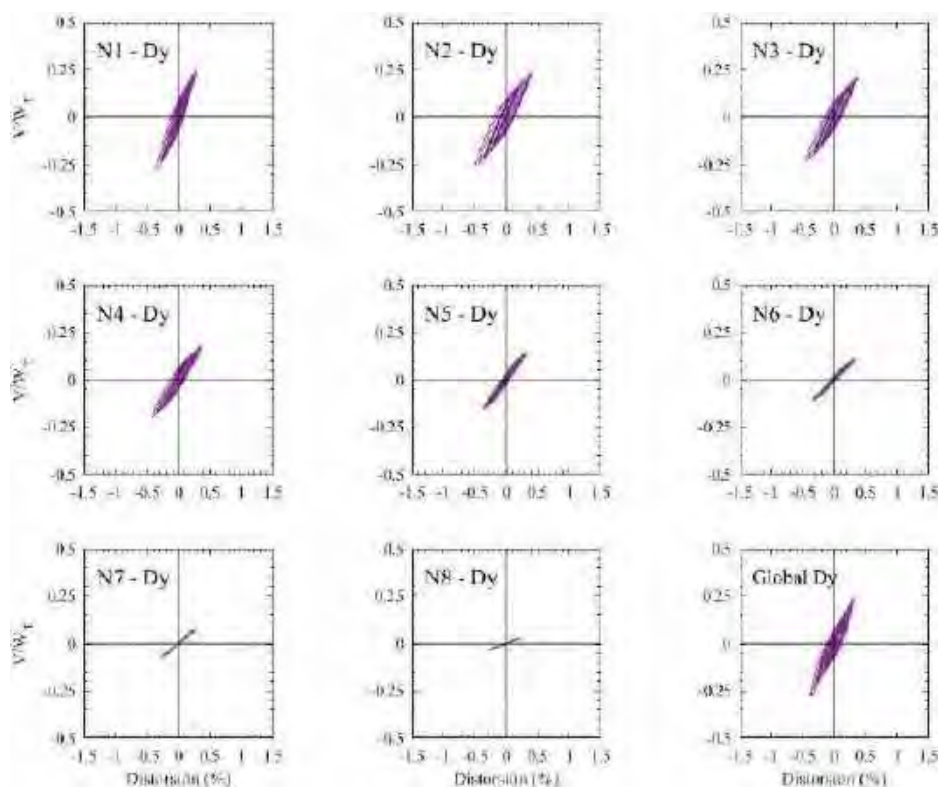


Figura F.50. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración AO24-B

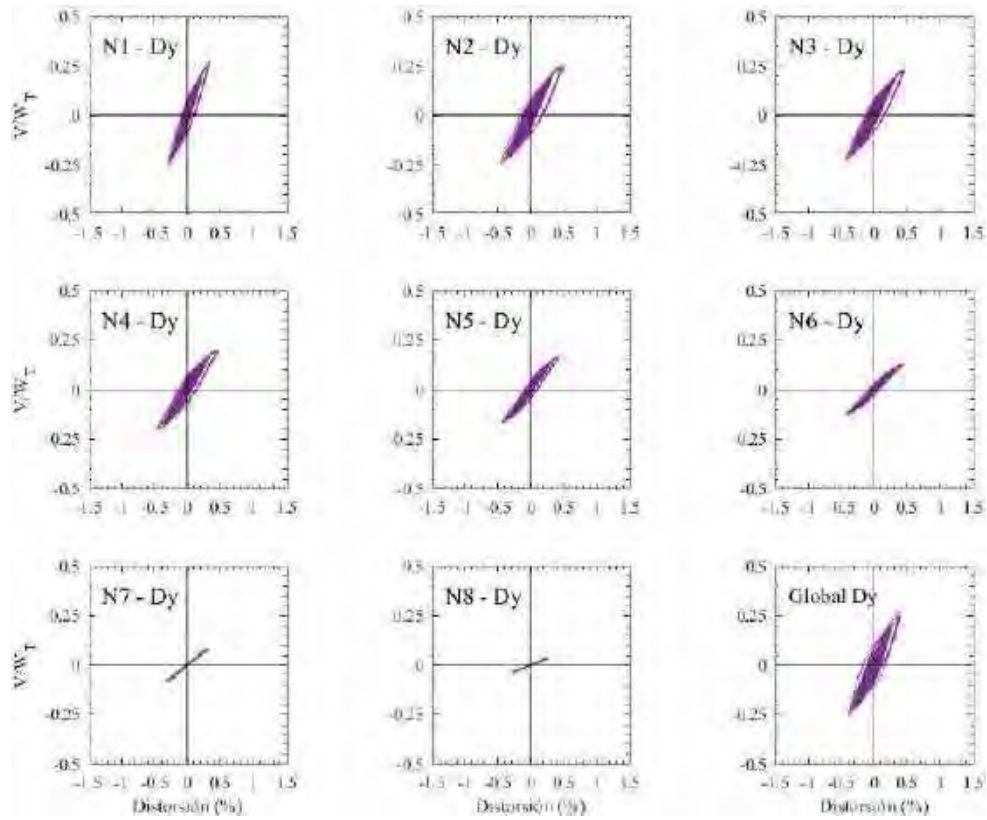


Figura F.51. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CLRT-A

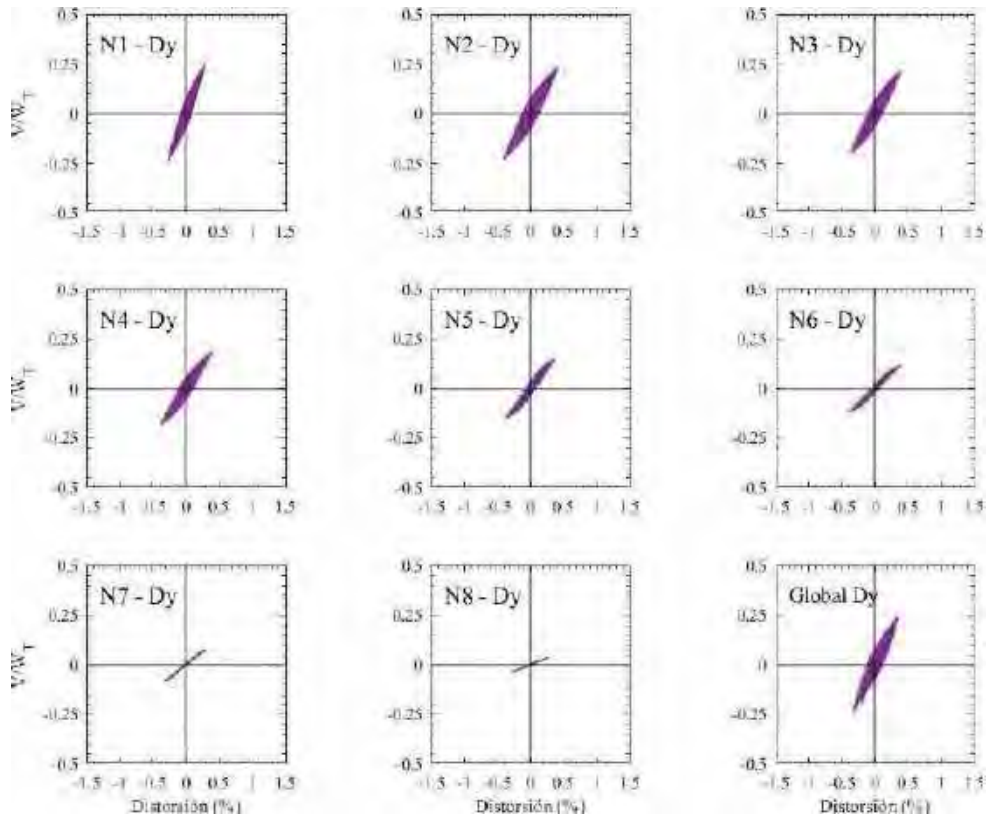


Figura F.52. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CLRT-B

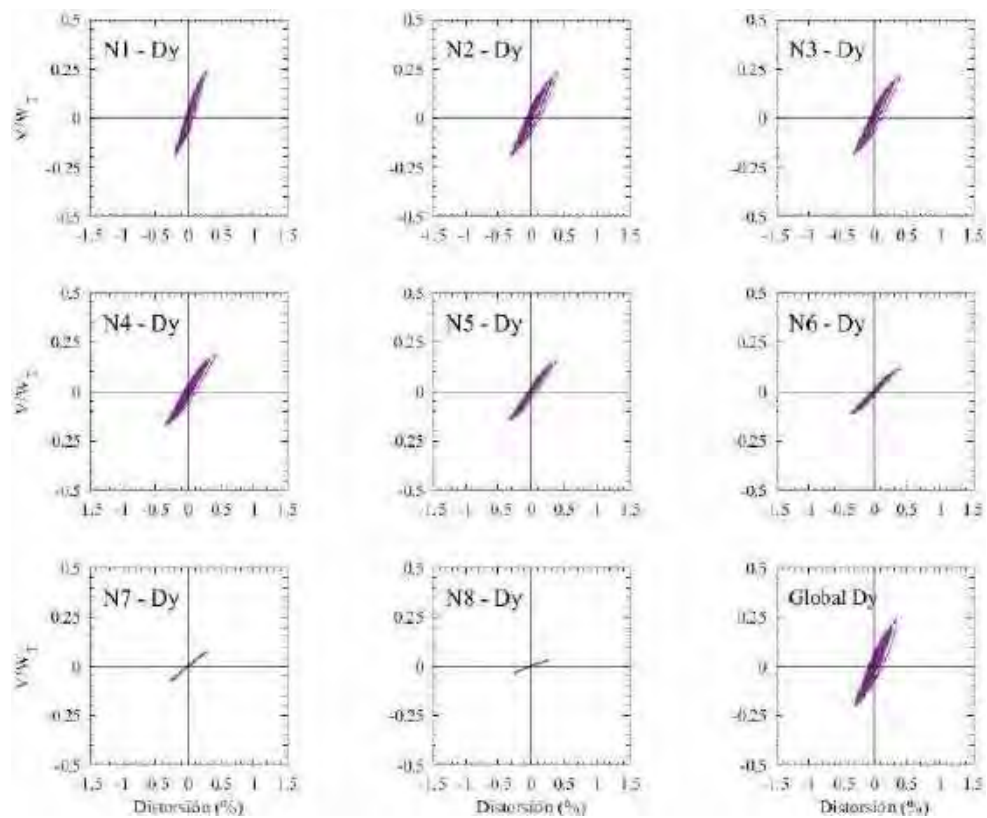


Figura F.53. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración COYS-A

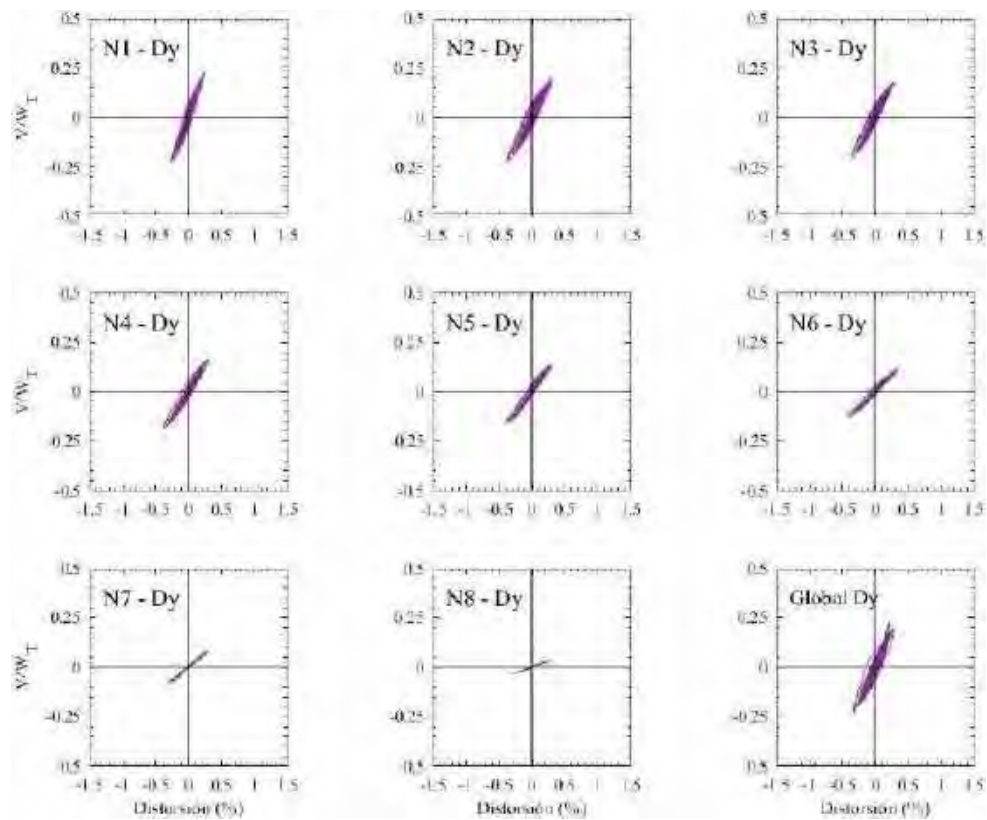


Figura F.54. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración COYS-B

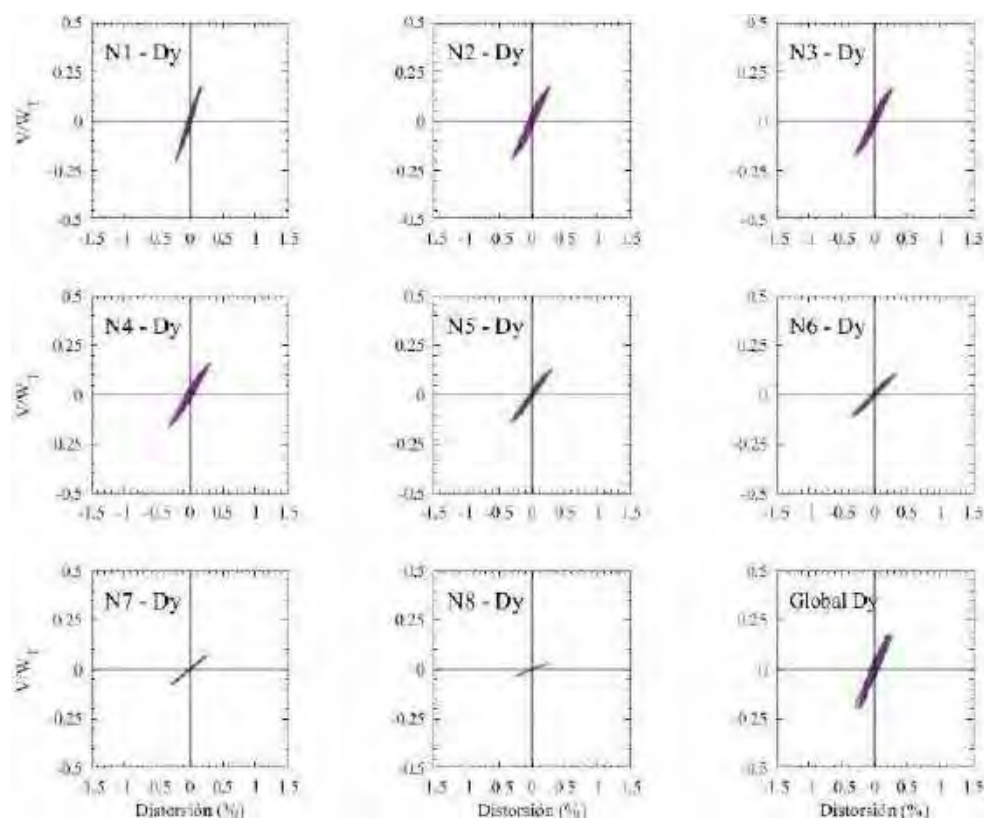


Figura F.55. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración DR16-A

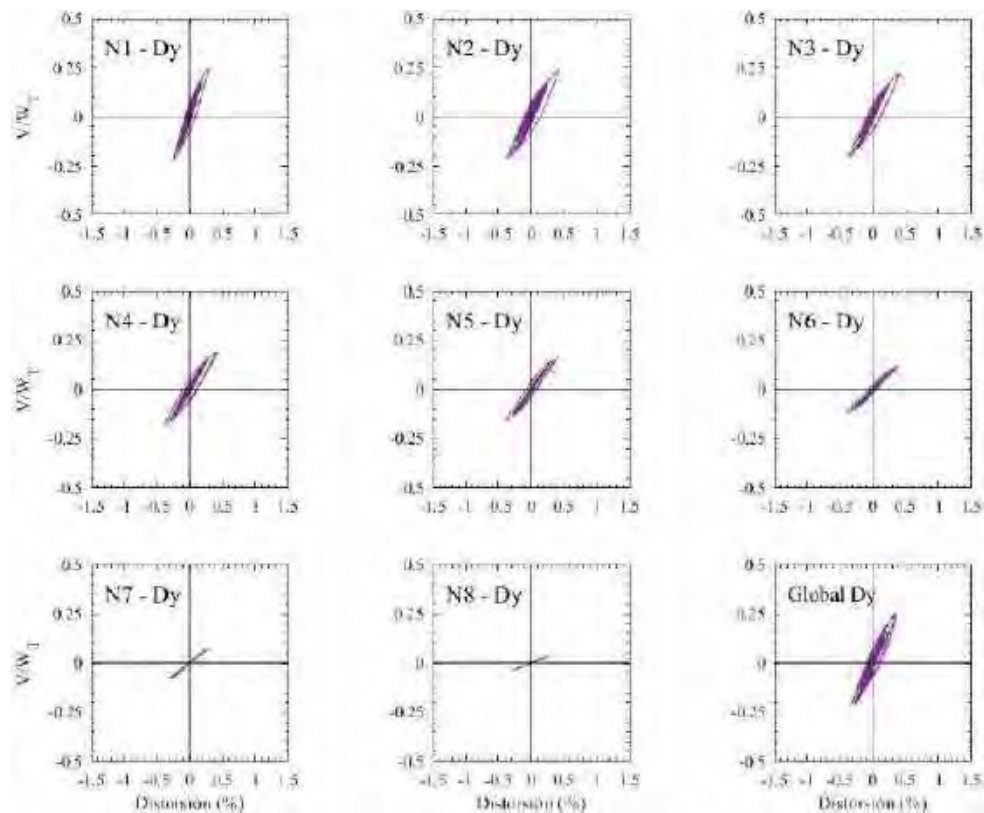


Figura F.56. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración DR16-B

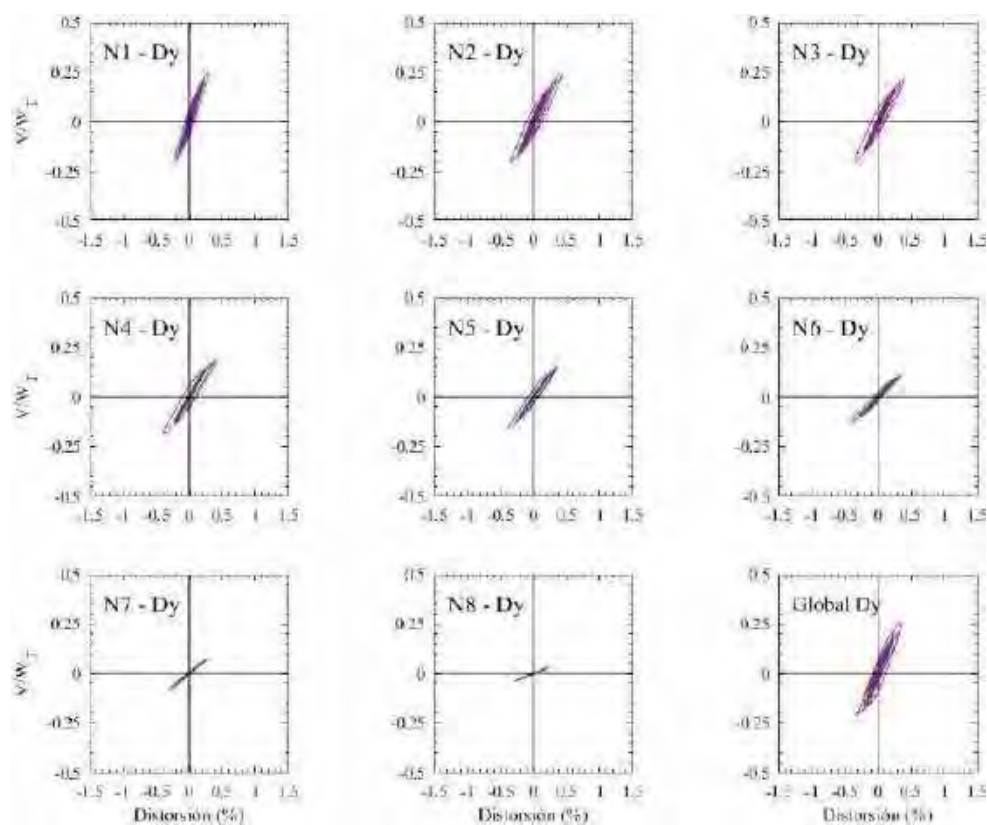


Figura F.57. Ciclos de histéresis de los entrapisos en dirección y, registros de aceleración EO30-A

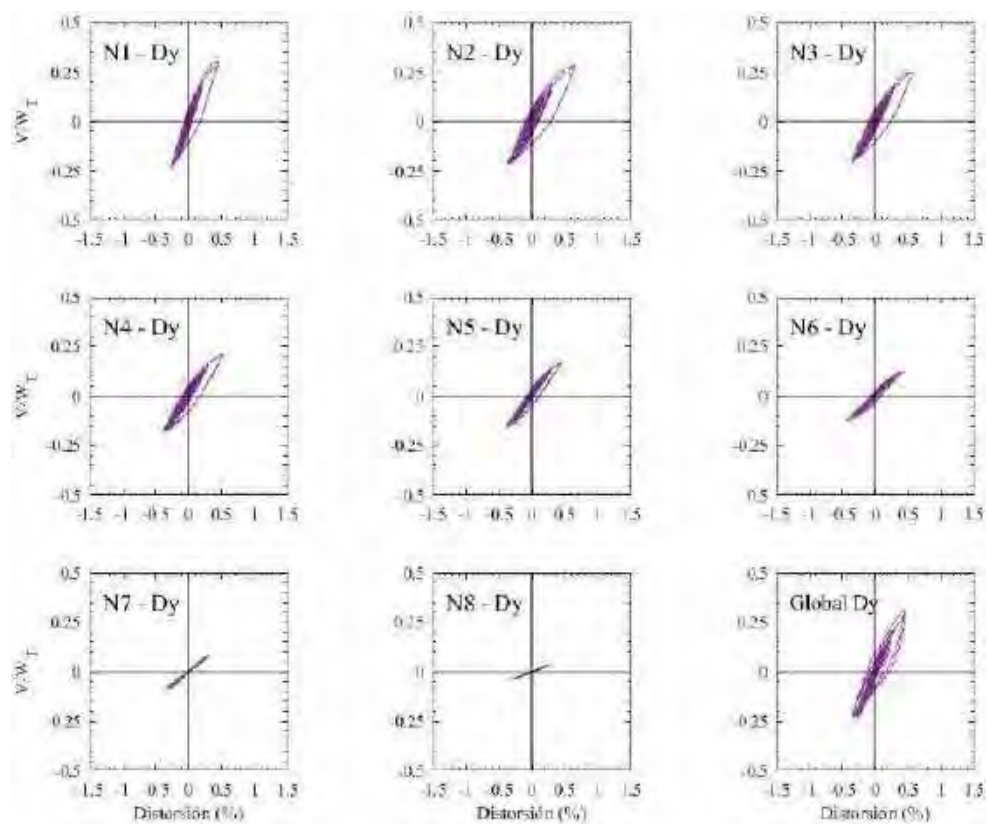


Figura F.58. Ciclos de histéresis de los entrapisos en dirección y, registros de aceleración EO30-B

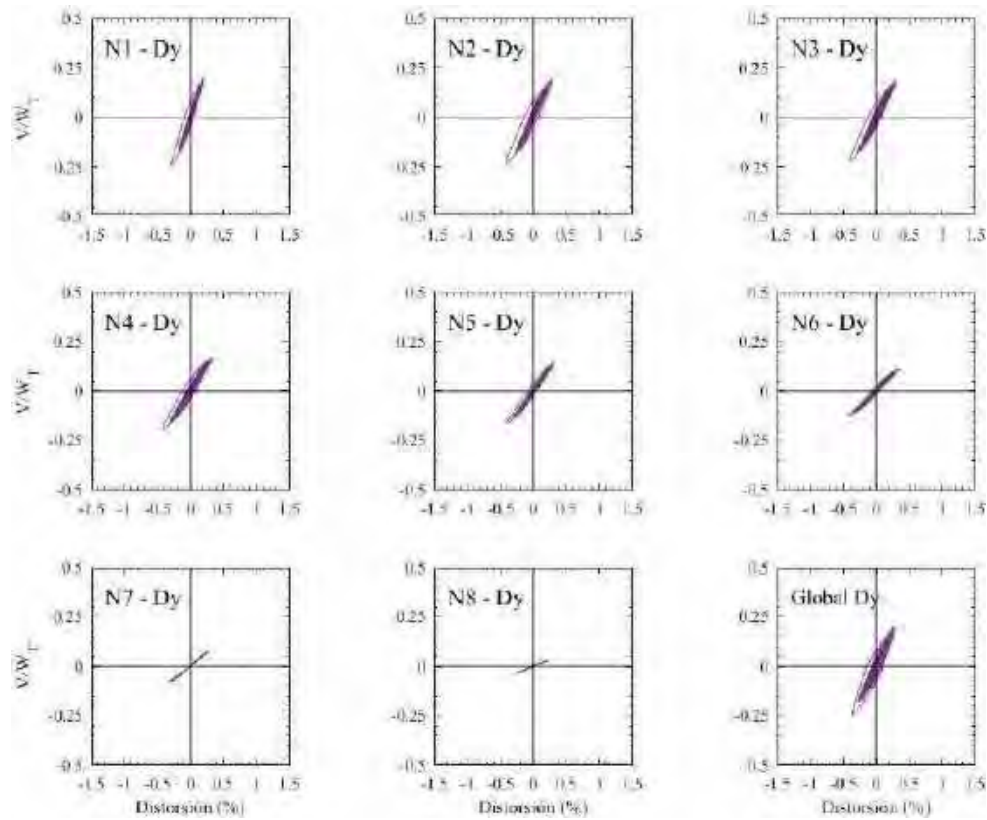


Figura F.59. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración GR27-A

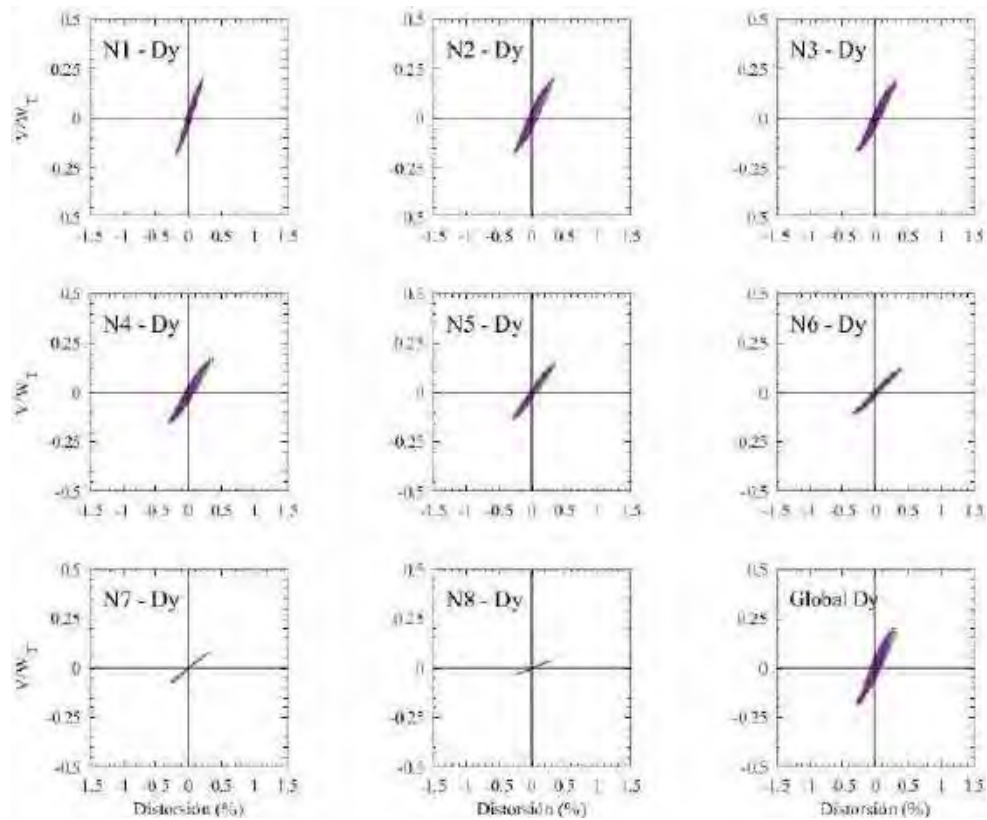


Figura F.60. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración GR27-B

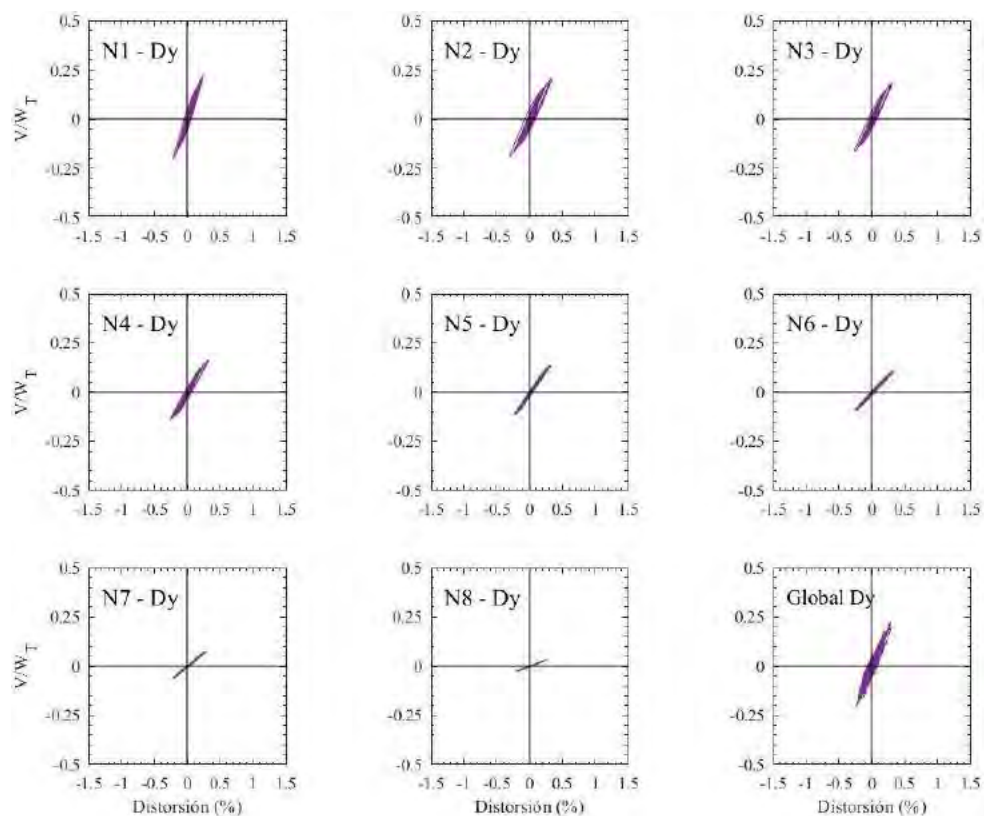


Figura F.61. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración SXVI-A (1985)

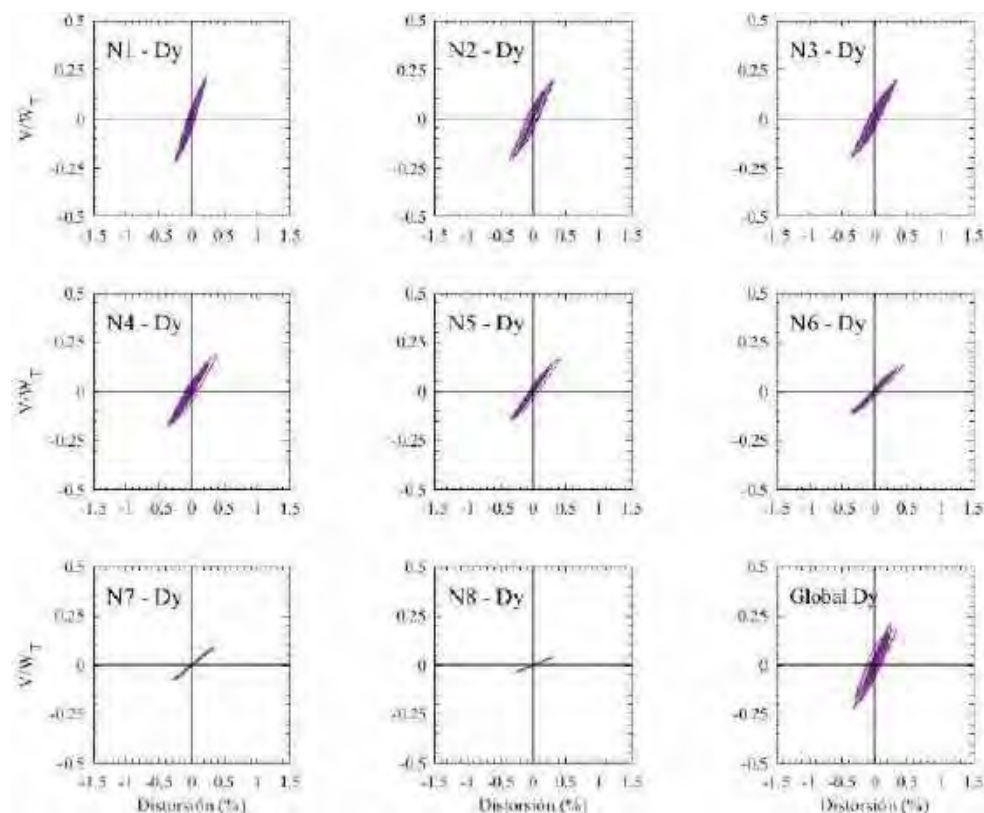


Figura F.62. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración SXVI-B (1985)

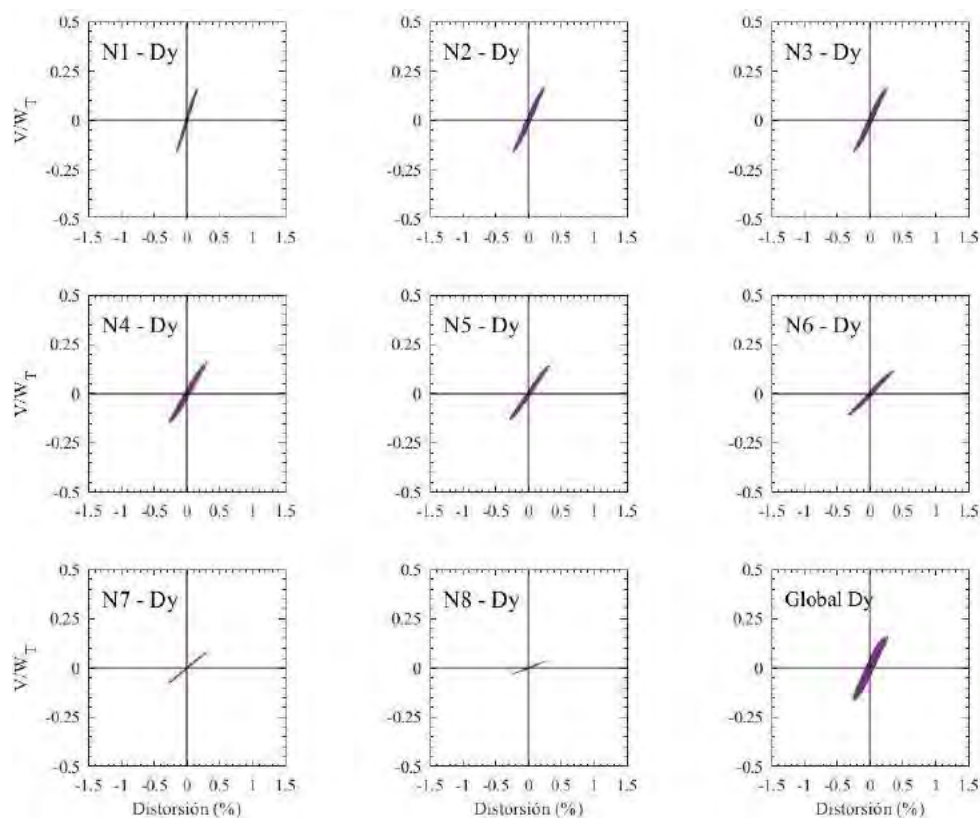


Figura F.63. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración GR27-A (2017)

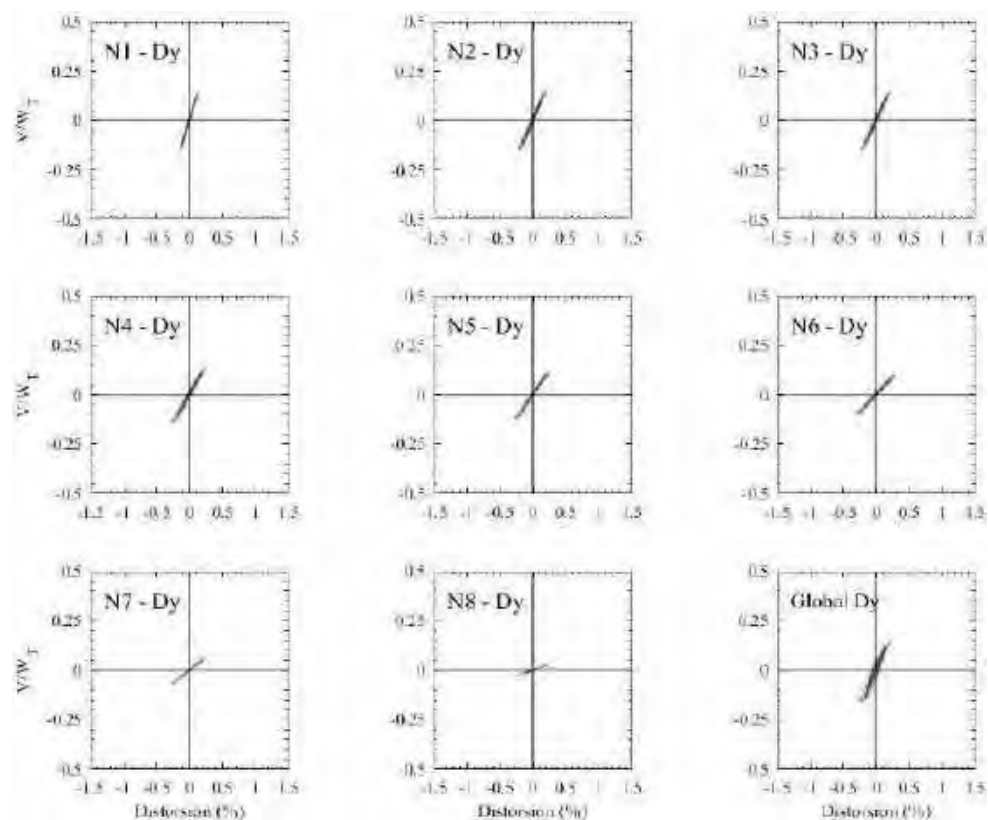


Figura F.64. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.1.5 Mapeos de fluencia en dirección x

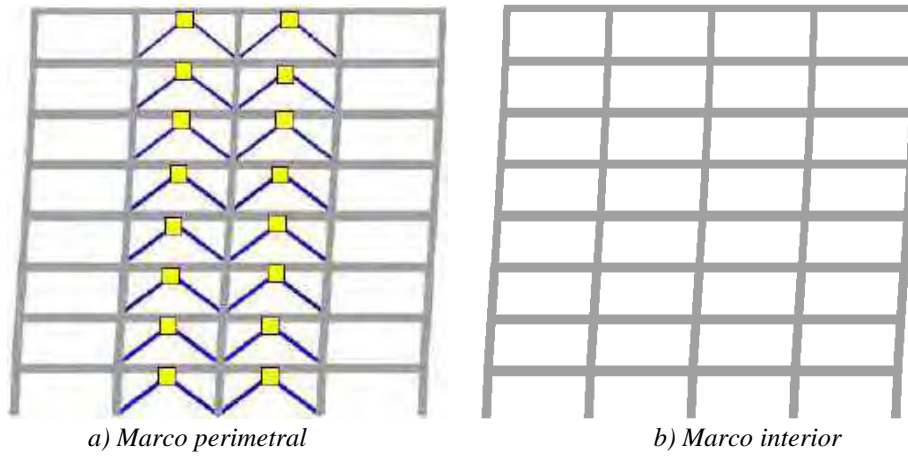


Figura F.65. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración AO24-A

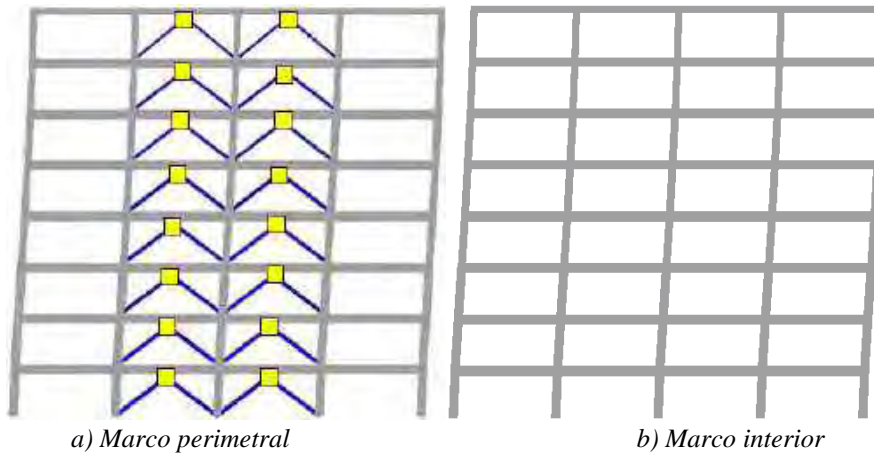


Figura F.66. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración AO24-B

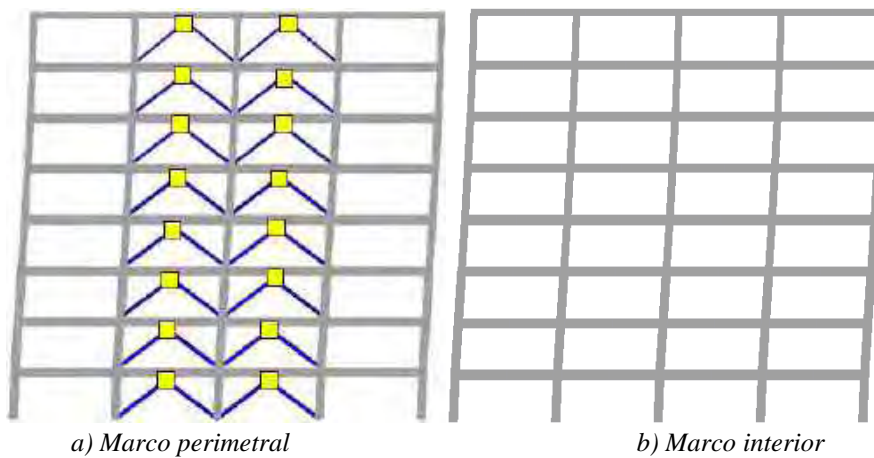
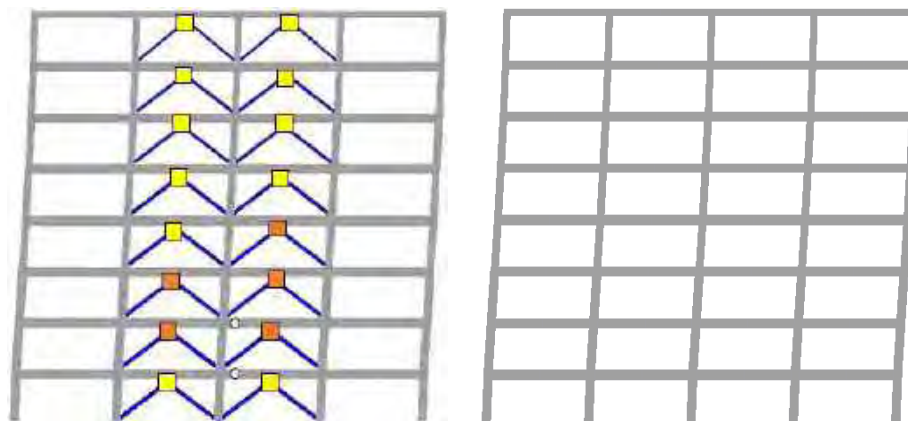


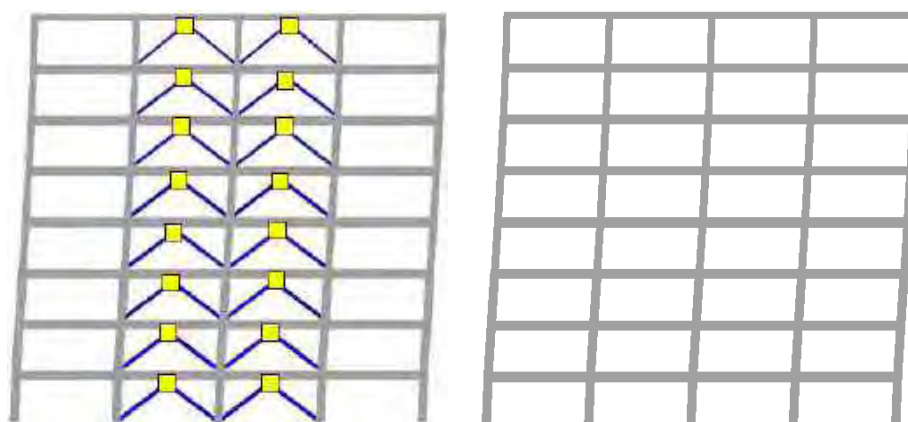
Figura F.67. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CLRT-A



a) Marco perimetral

b) Marco interior

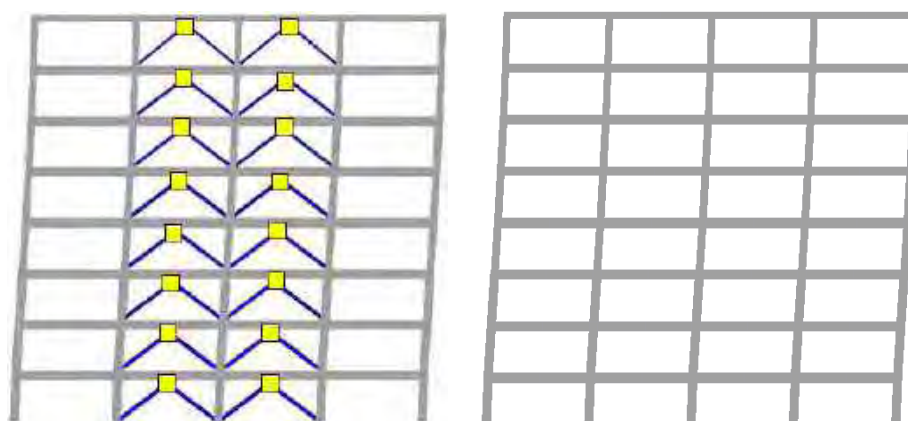
Figura F.68. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CLRT-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

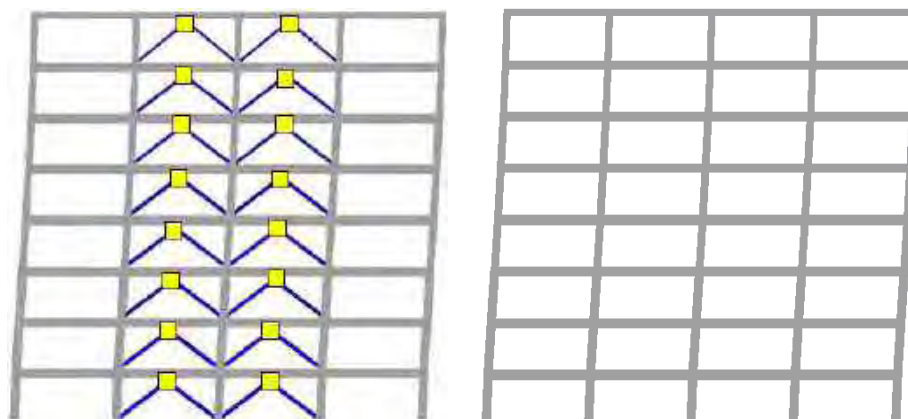
Figura F.69. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración COYS-A



a) Marco perimetral

b) Marco interior

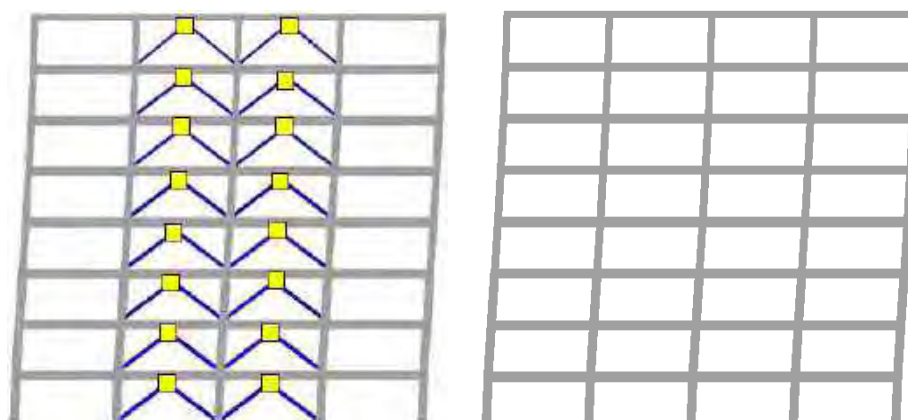
Figura F.70. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración COYS-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

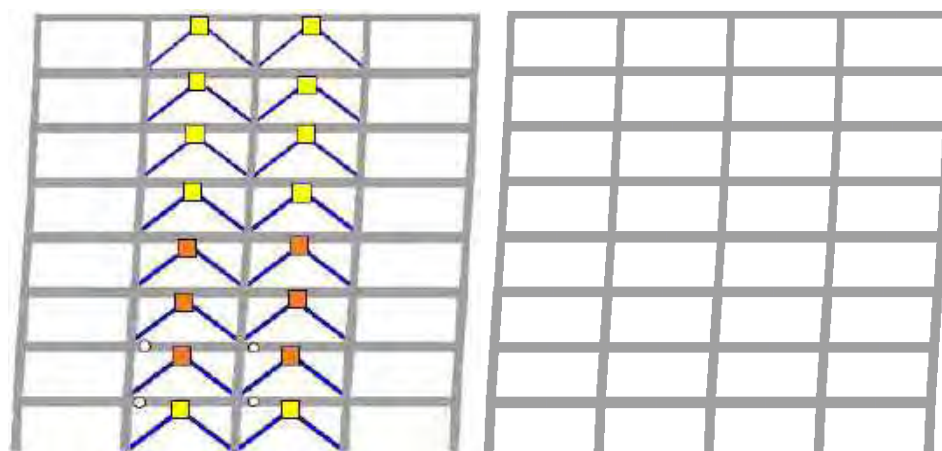
Figura F.71. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DR16-A



a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura F.72. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DR16-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura F.73. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración EO30-A

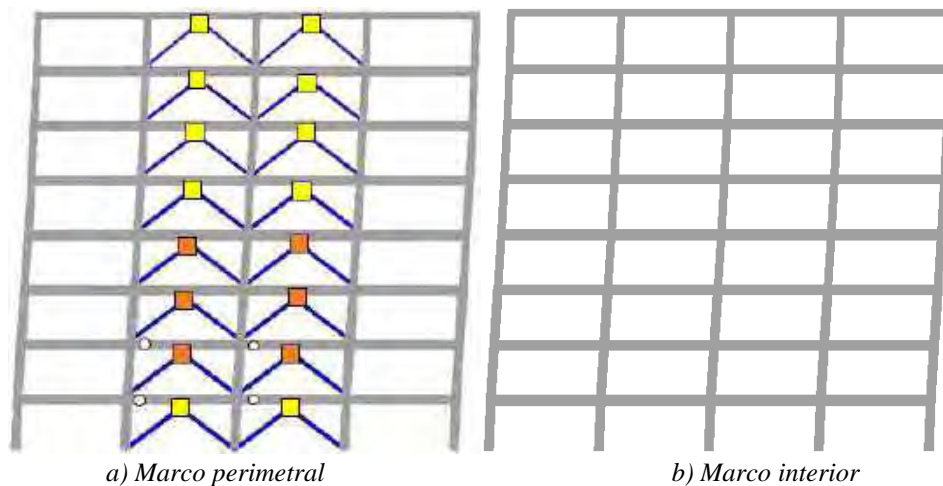


Figura F.74. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración EO30-B

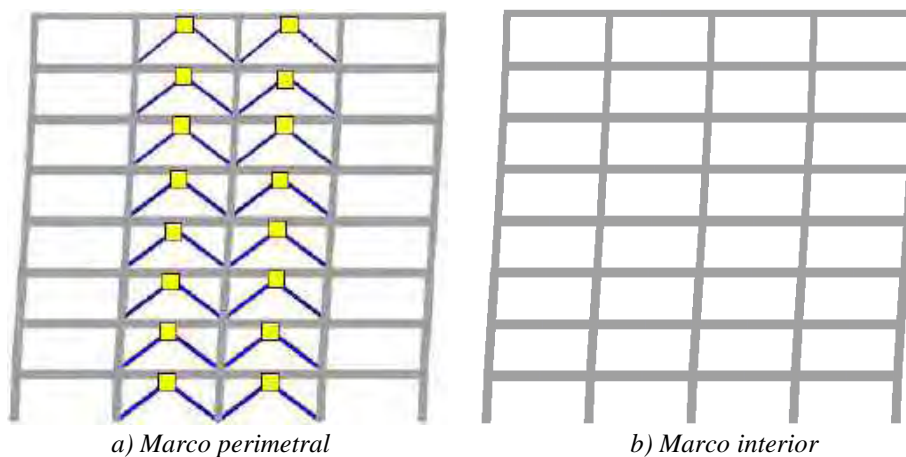


Figura F.75. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-A

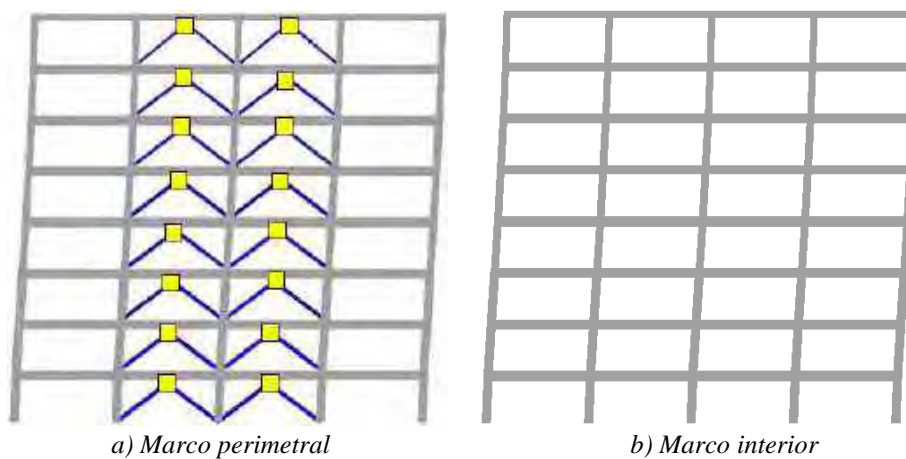


Figura F.76. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-B

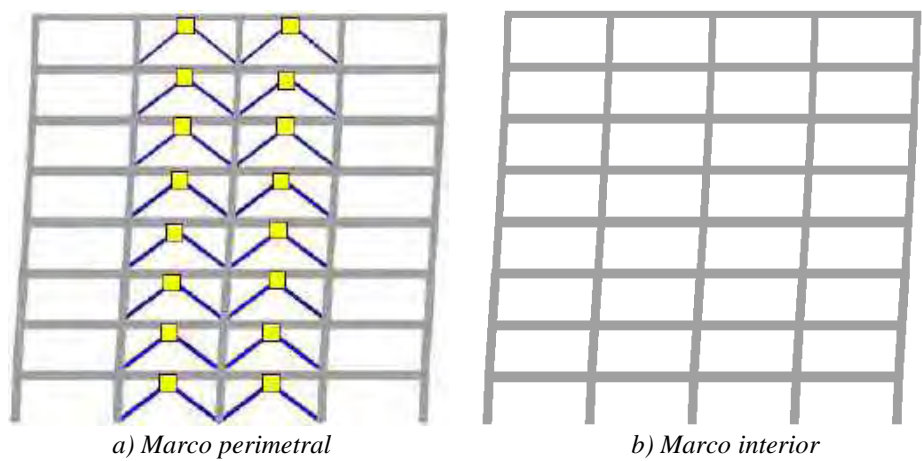


Figura F.77. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SXVI-A (1985)

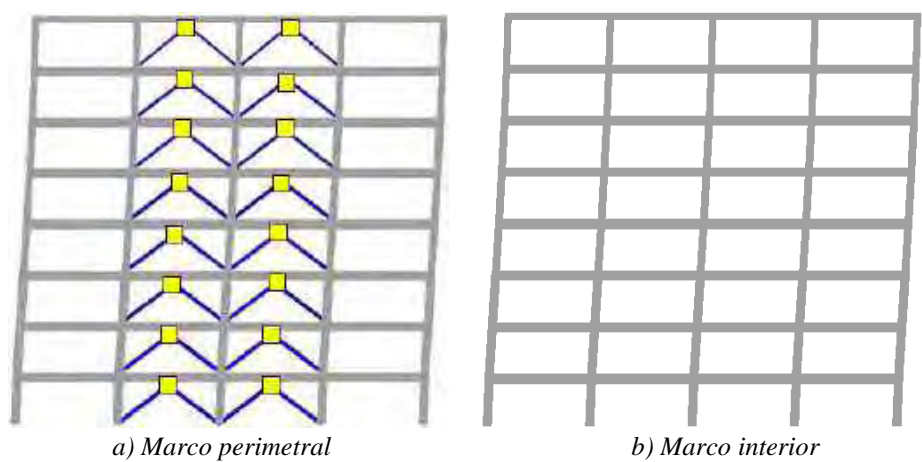


Figura F.78. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SXVI-B (1985)

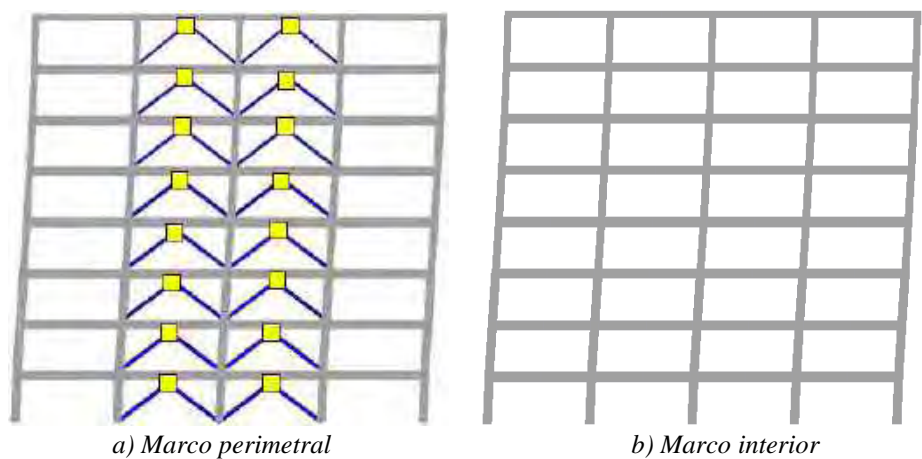


Figura F.79. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-A (2017)

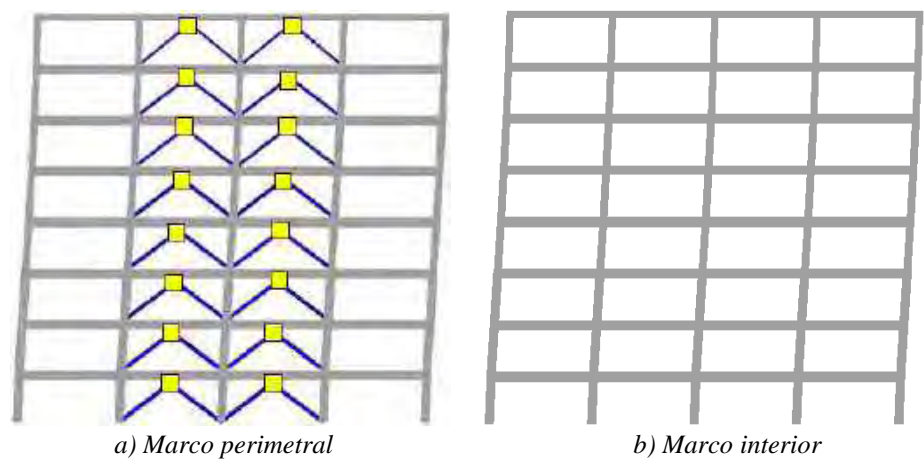


Figura F.80. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.1.6 Mapeos de fluencia en dirección y

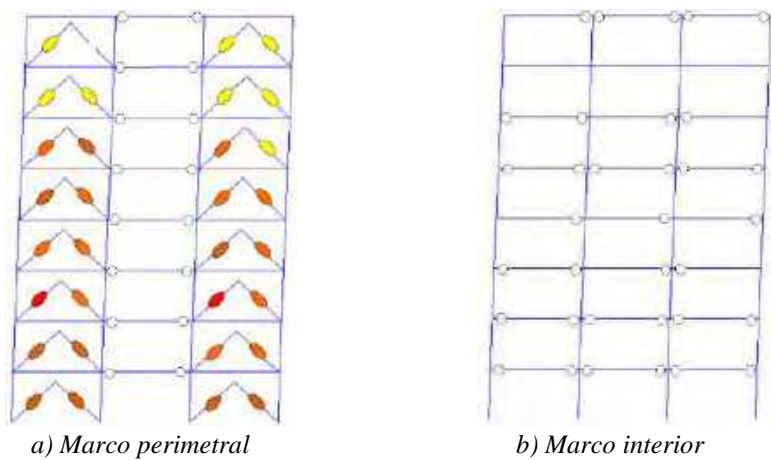


Figura F.81. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración AO24-A

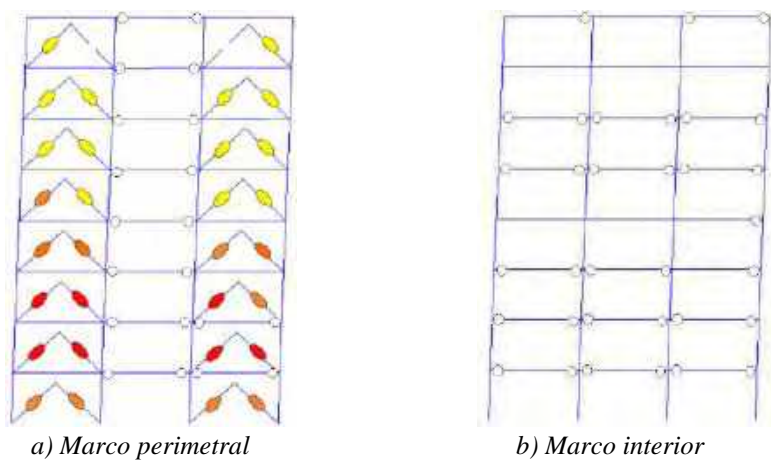
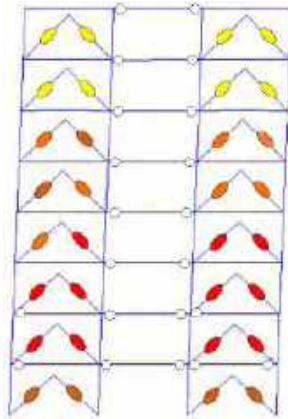


Figura F.82. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración AO24-B

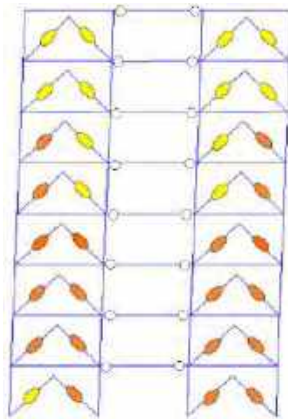


a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura F.83. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CLRT-A

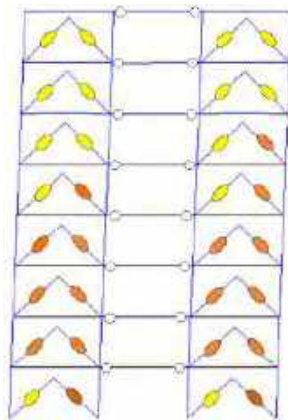


a) Marco perimetral

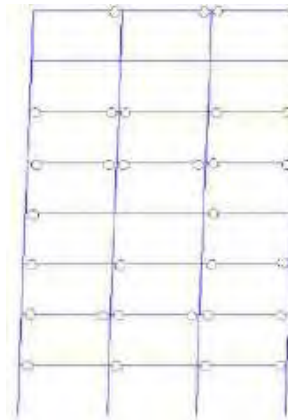


b) Marco interior

Figura F.84. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CLRT-B

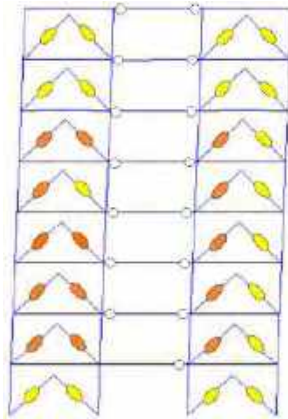


a) Marco perimetral

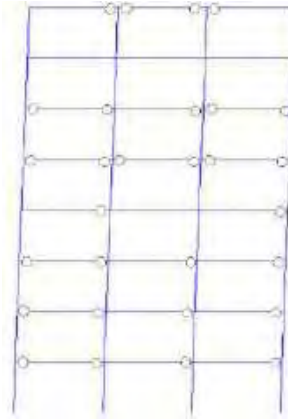


b) Marco interior

Figura F.85. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración COYS-A

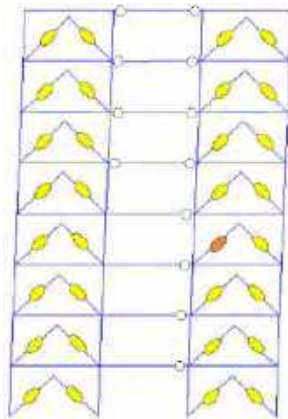


a) Marco perimetral

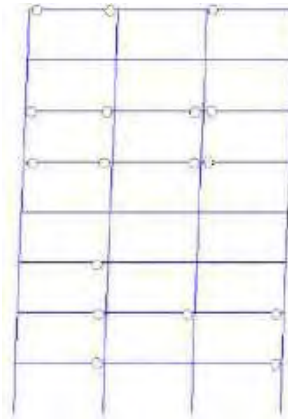


b) Marco interior

Figura F.86. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración COYS-B

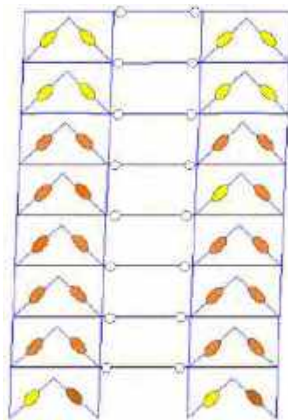


a) Marco perimetral

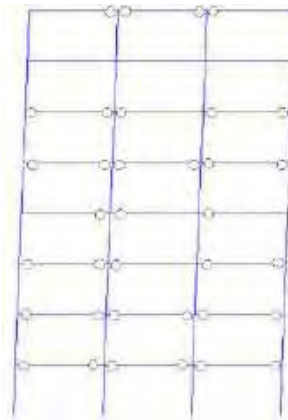


b) Marco interior

Figura F.87. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DR16-A

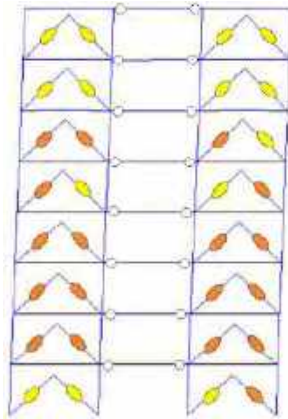


a) Marco perimetral

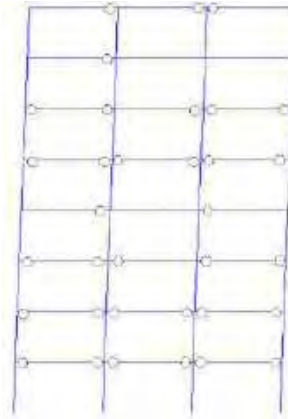


b) Marco interior

Figura F.88. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DR16-B

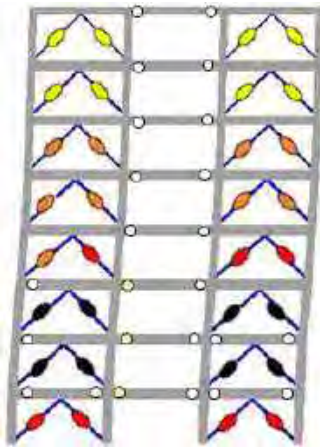


a) Marco perimetral

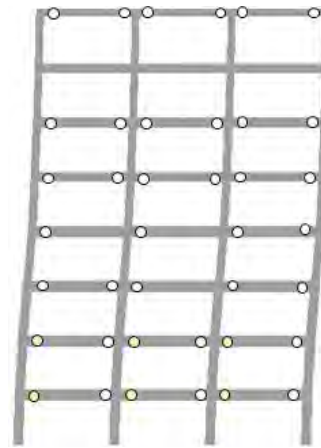


b) Marco interior

Figura F.89. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración EO30-A

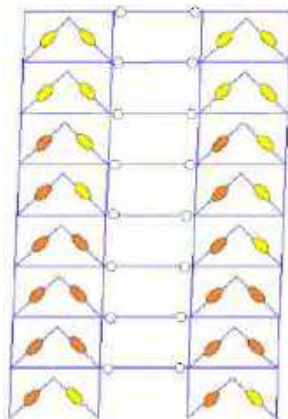


a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura F.90. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración EO30-B

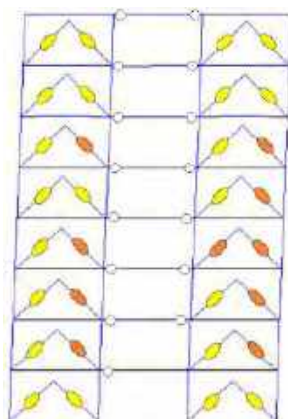


a) Marco perimetral

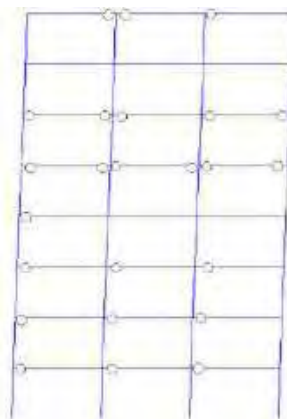


b) Marco interior

Figura F.91. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-A

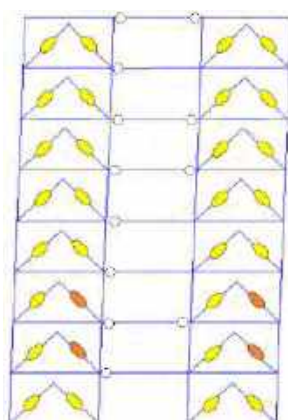


a) Marco perimetral

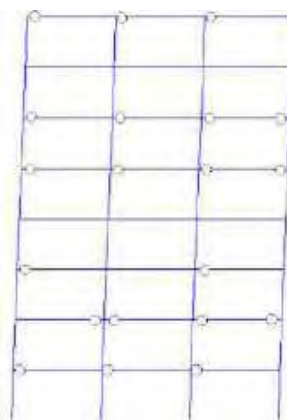


b) Marco interior

Figura F.92. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-B

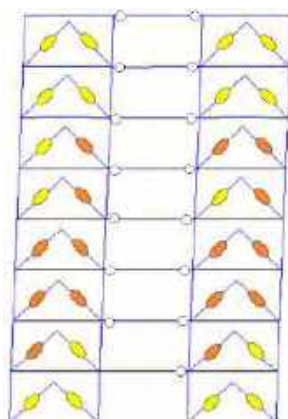


a) Marco perimetral

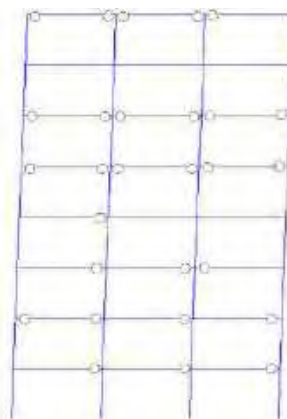


b) Marco interior

Figura F.93. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SXVI-A (1985)

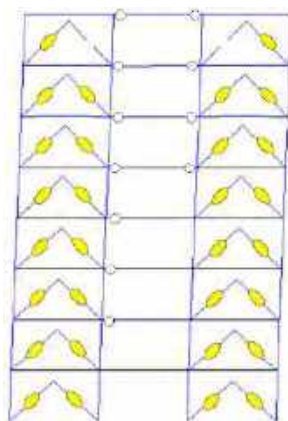


a) Marco perimetral

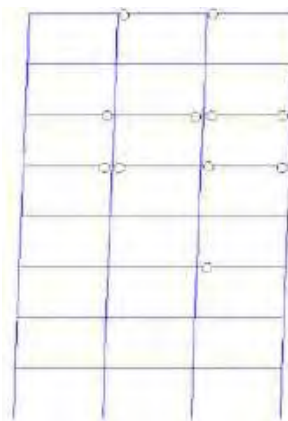


b) Marco interior

Figura F.94. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SXVI-B (1985)

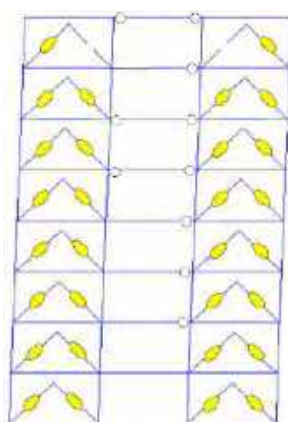


a) Marco perimetral

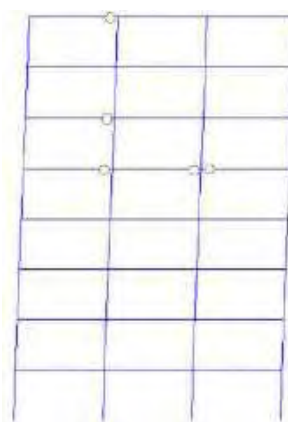


b) Marco interior

Figura F.95. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-A (2017)



a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura F.96. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.1.7 Respuesta Global

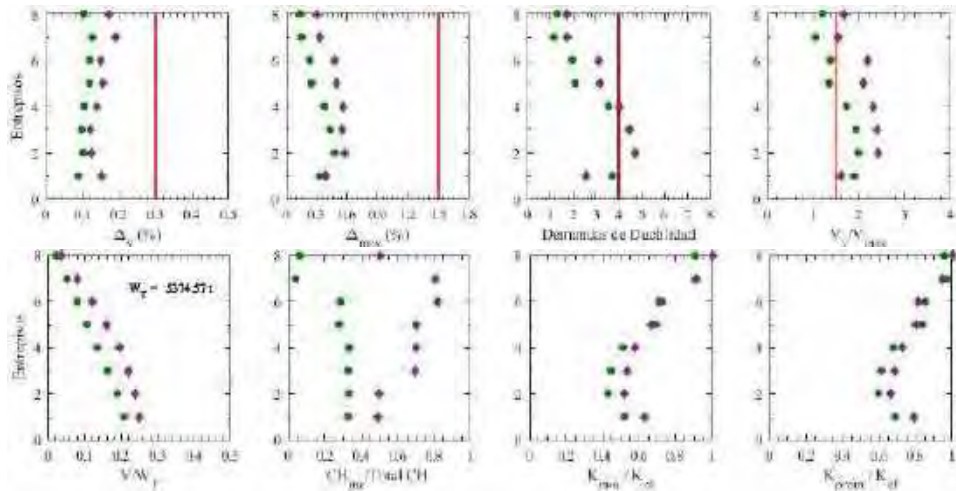


Figura F.97. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración AO24-A

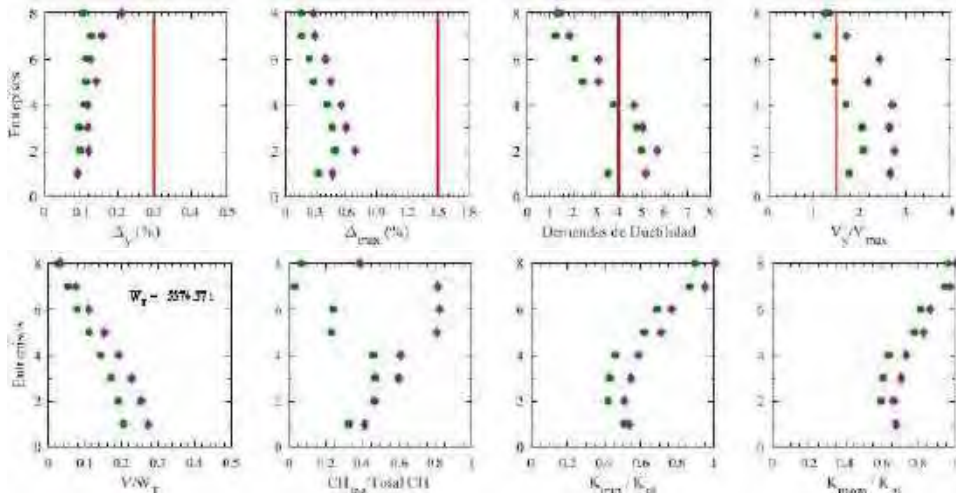


Figura F.98. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración AO24-B

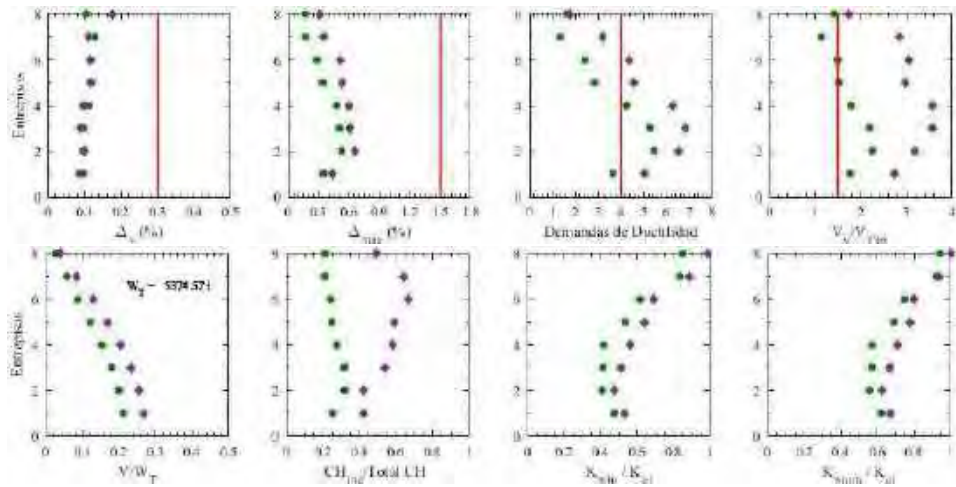


Figura F.99. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CLRT-A

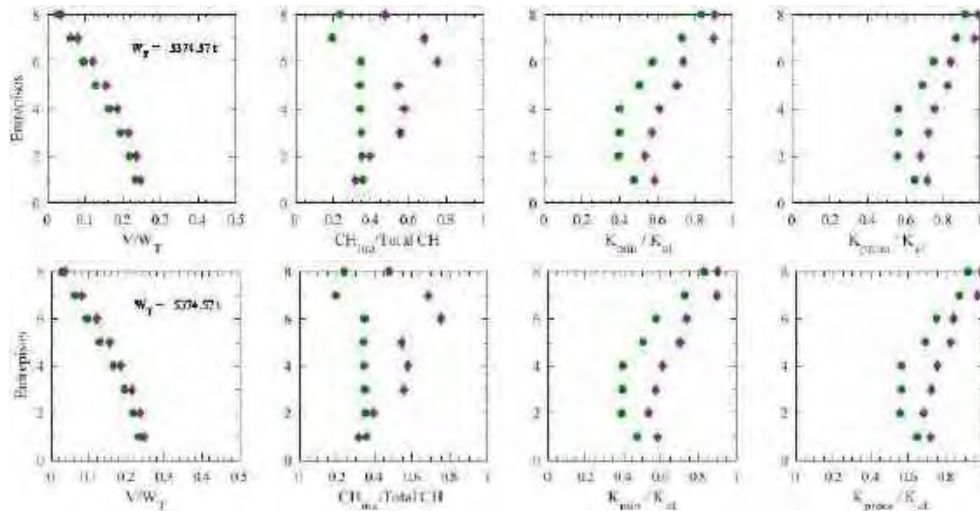


Figura F.100. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CLRT-B

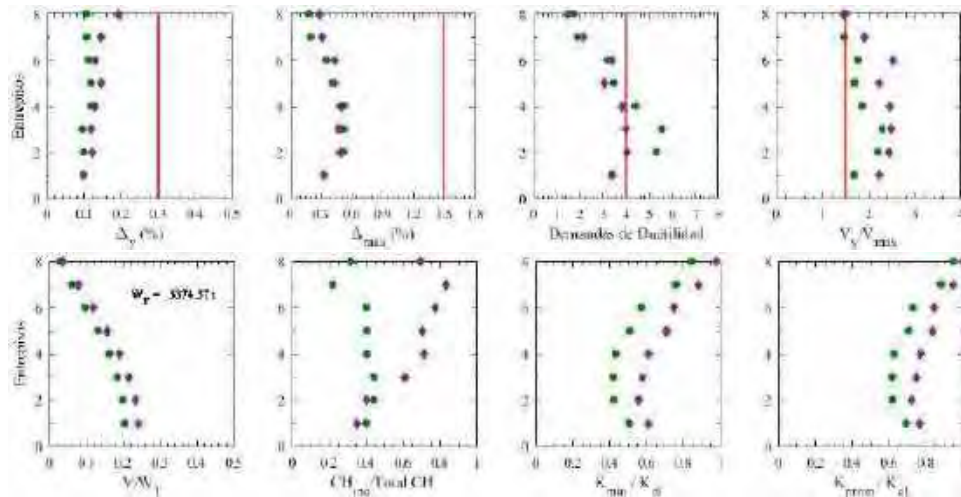


Figura F.101. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración COYS-A

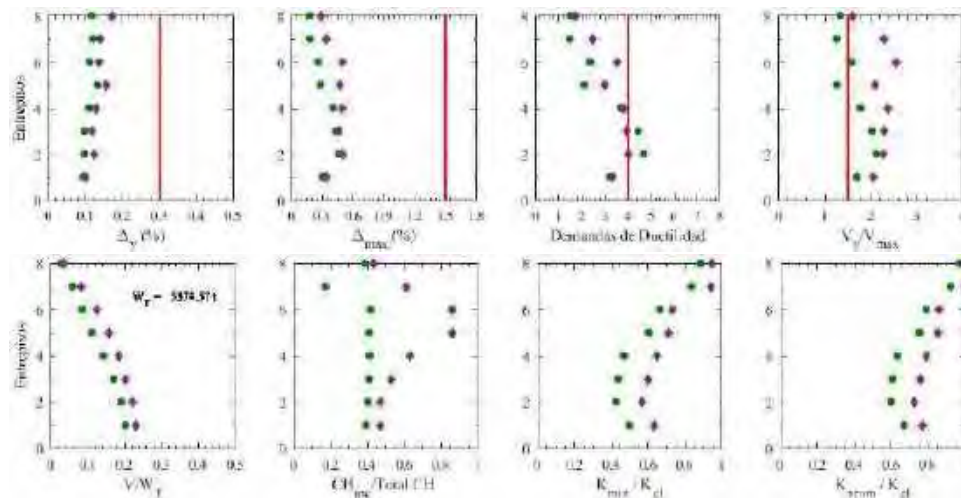


Figura F.102. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración COYS-B

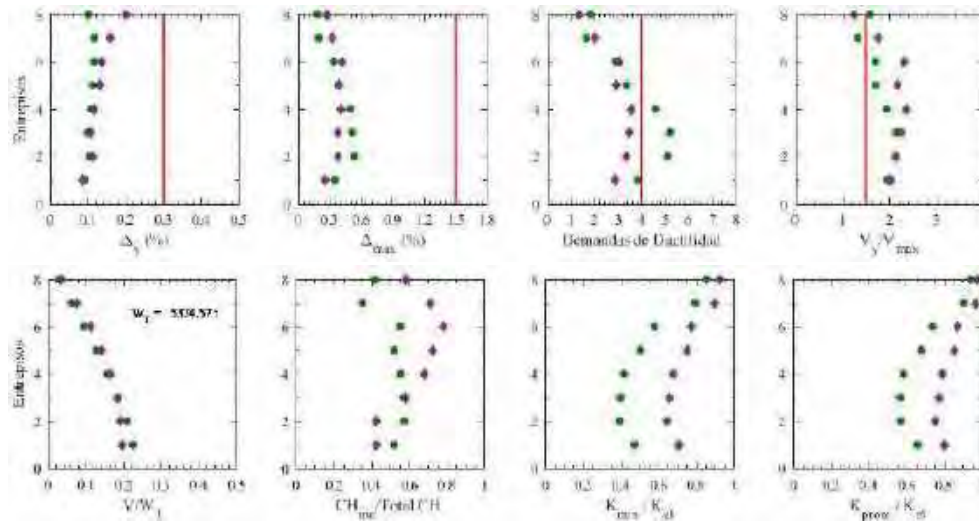


Figura F.103. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DR16-A

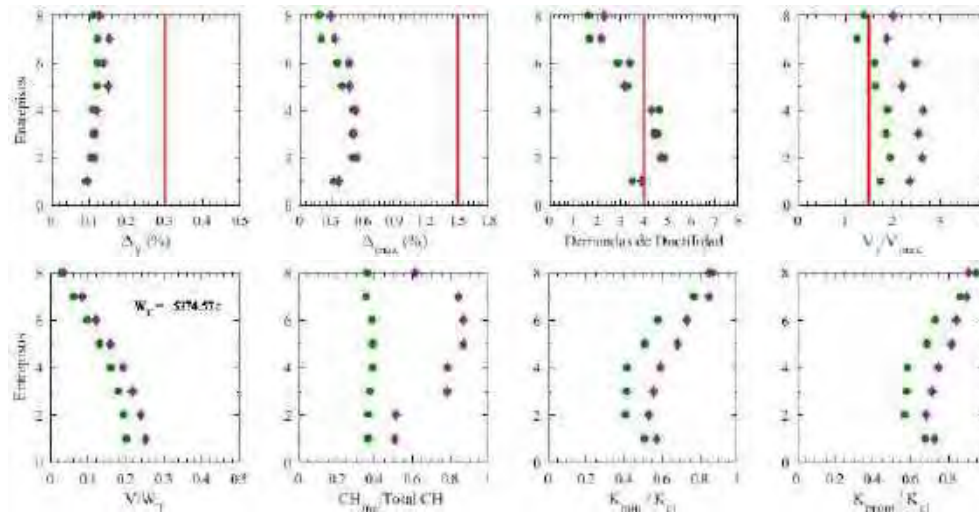


Figura F.104. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DR16-B

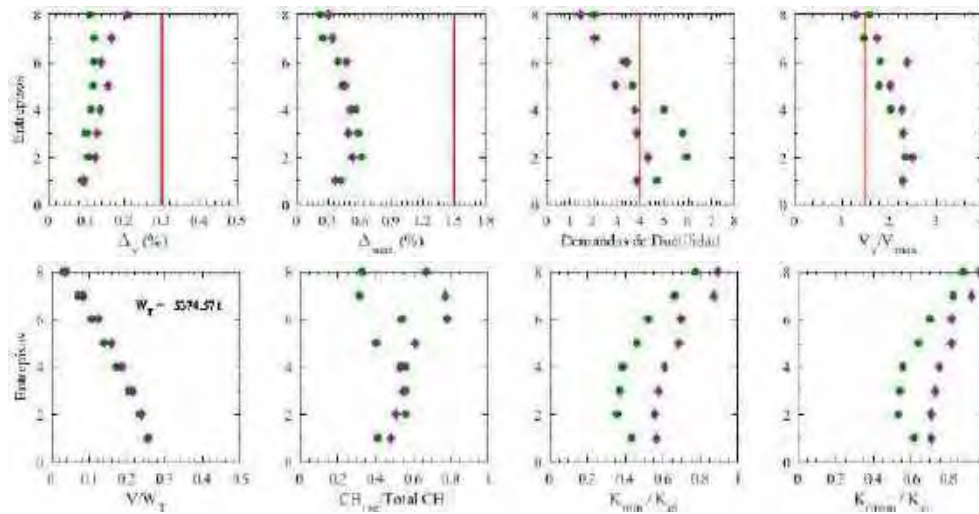


Figura F.105. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración EO30-A

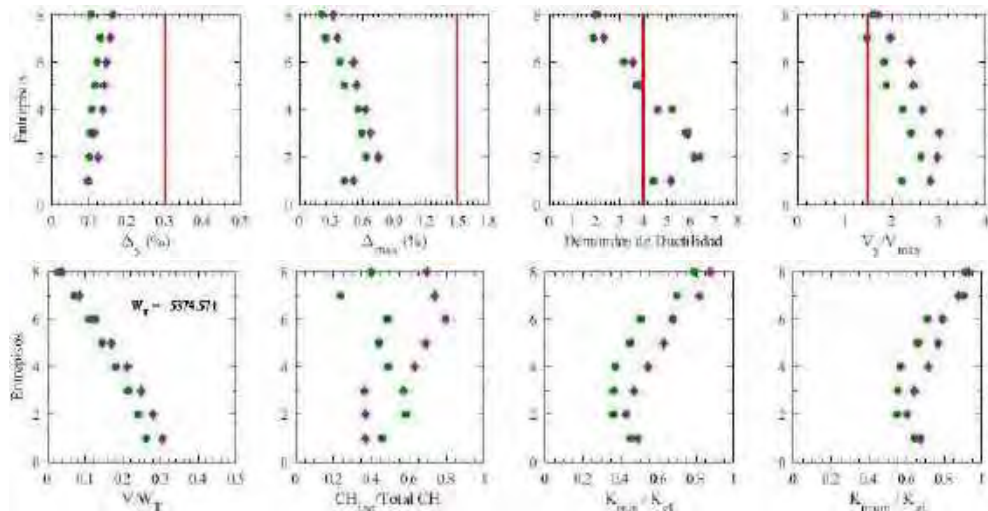


Figura F.106. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración EO30-B

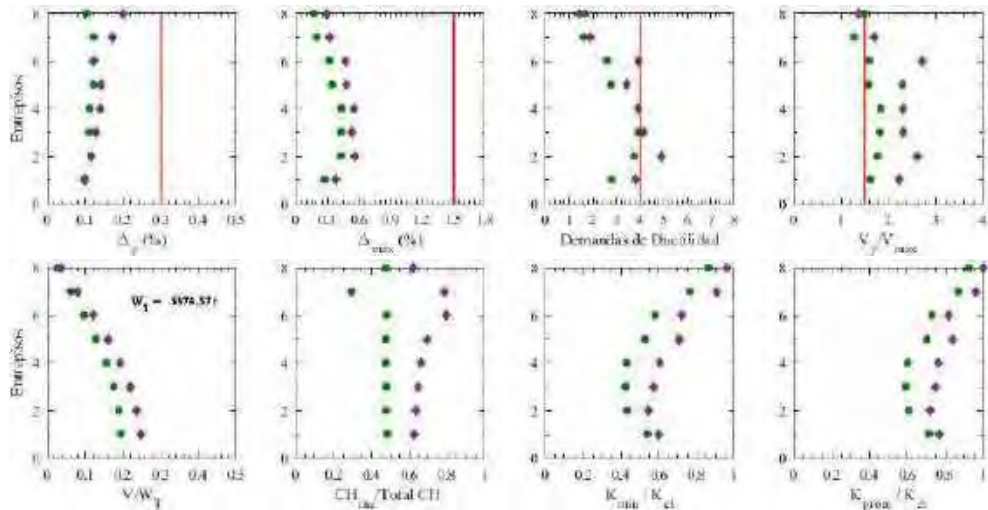


Figura F.107. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración GR27-A

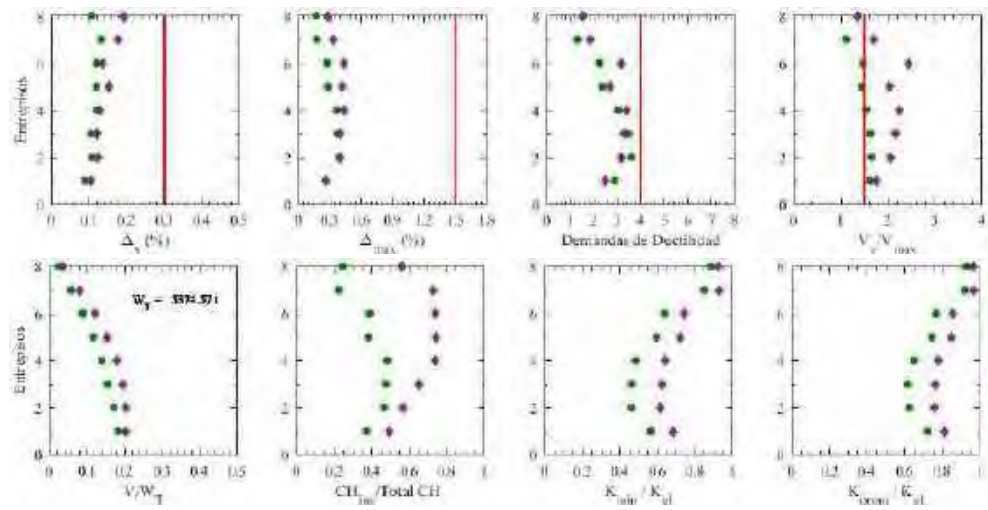


Figura F.108. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración GR27-B

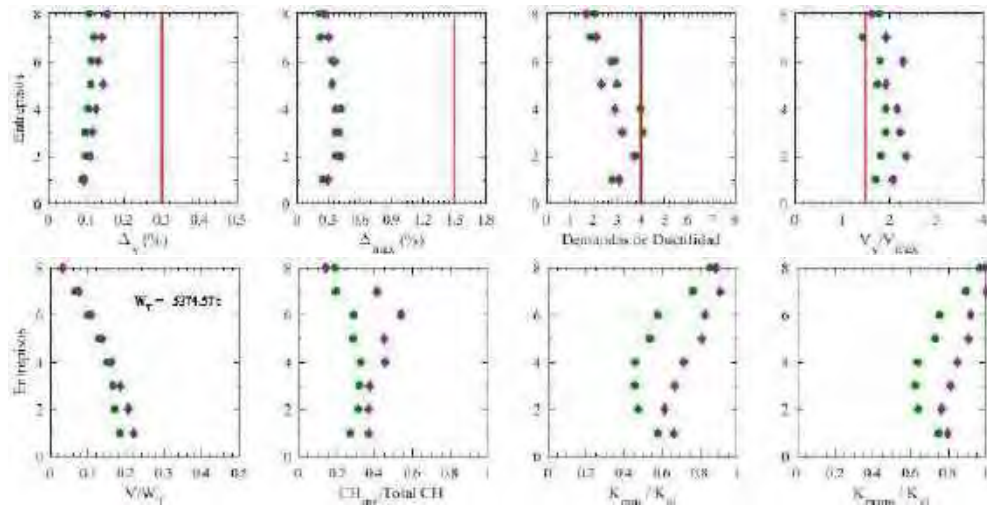


Figura F.109. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración SXVI-A (1985)

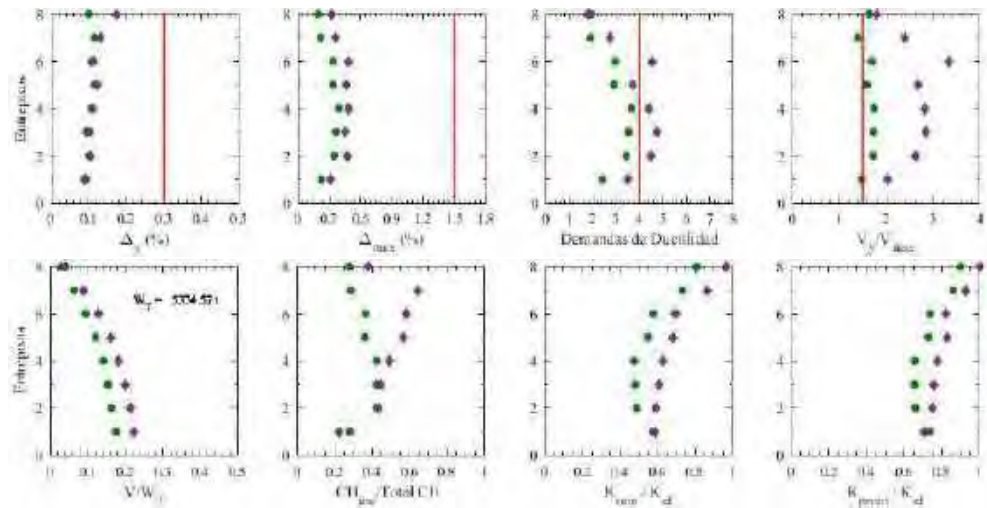


Figura F.110. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración SXVI-B (1985)

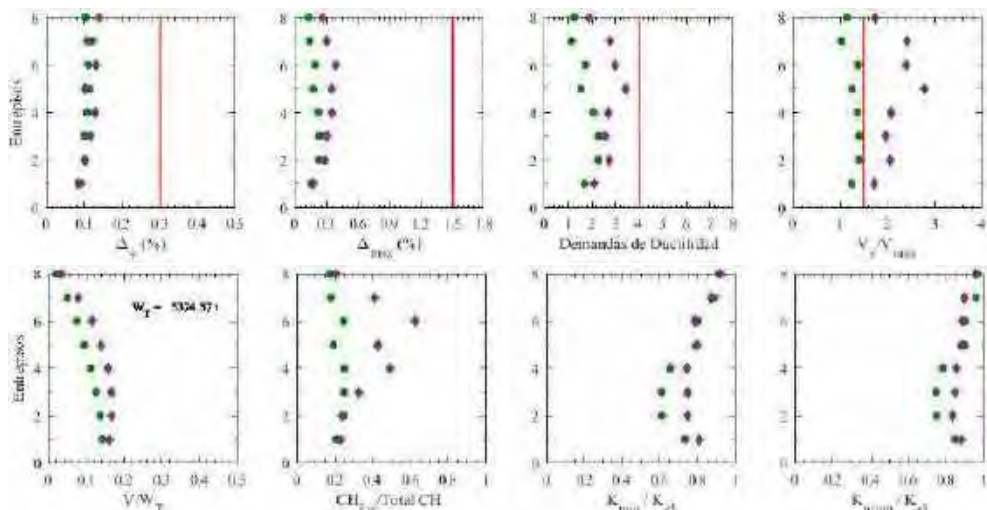


Figura F.111. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración GR27-A (2017)

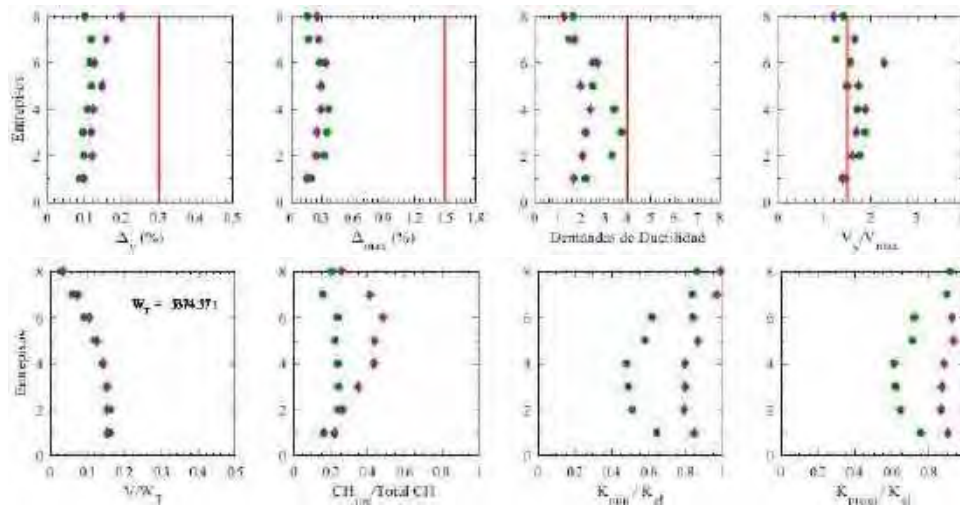


Figura F.112. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.1.8 Distorsiones Residuales

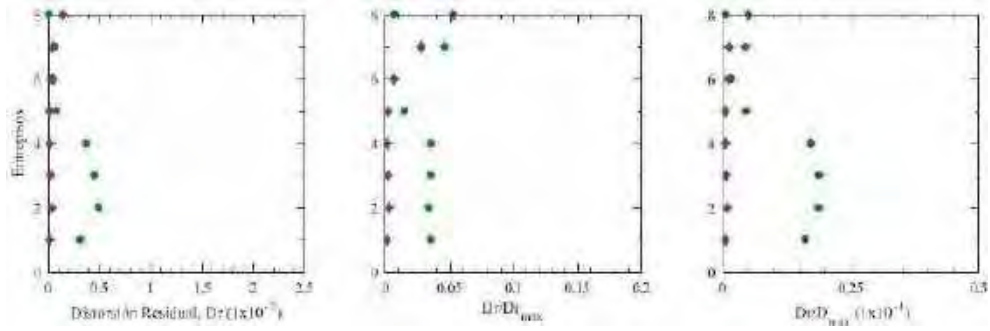


Figura F.113. Distorsiones residuales, registros de aceleración AO24-A

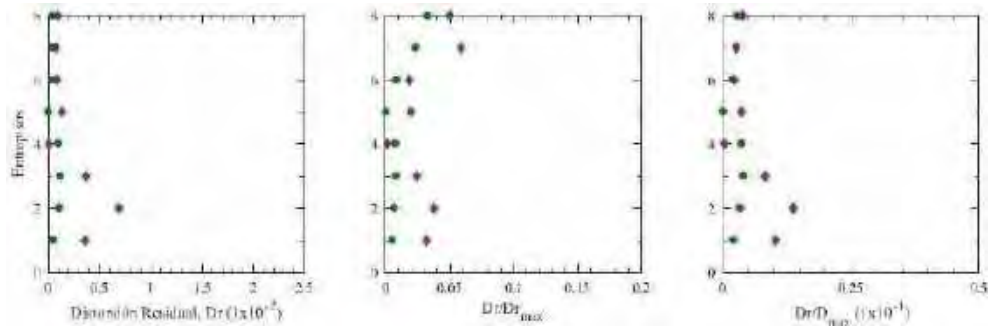


Figura F.114. Distorsiones residuales, registros de aceleración AO24-B

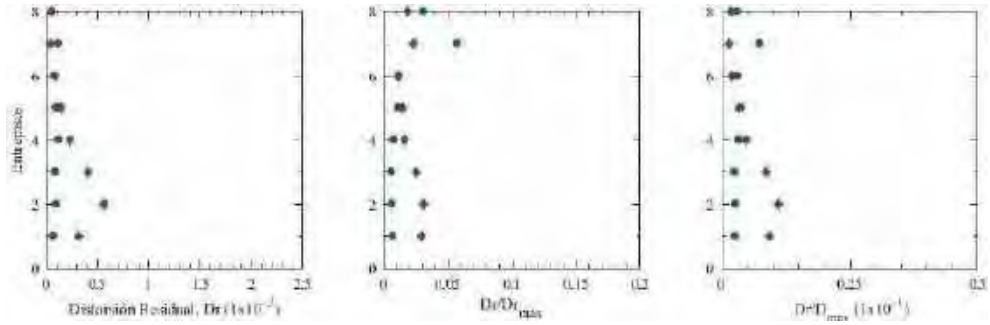


Figura F.115. Distorsiones residuales, registros de aceleración CLRT-A

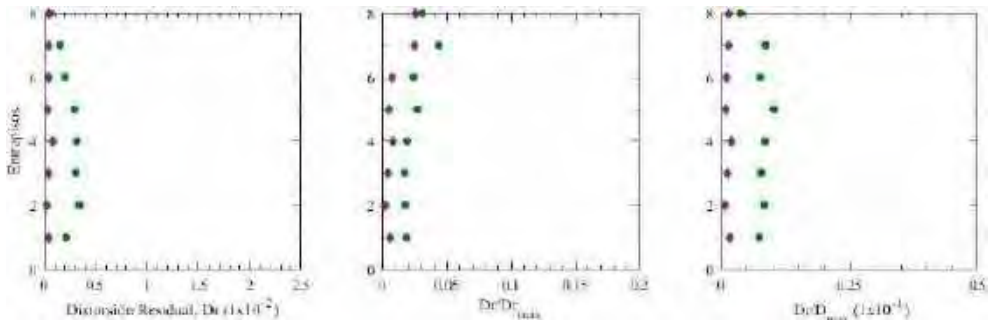


Figura F.116. Distorsiones residuales, registros de aceleración CLRT-B

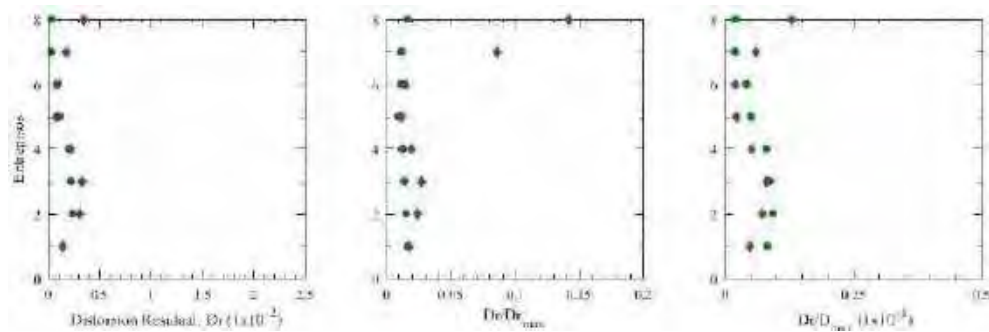


Figura F.117. Distorsiones residuales, registros de aceleración COYS-A

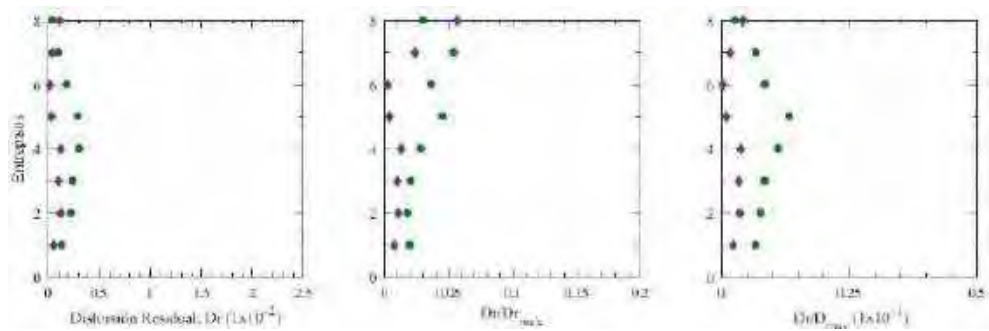


Figura F.118. Distorsiones residuales, registros de aceleración COYS-B

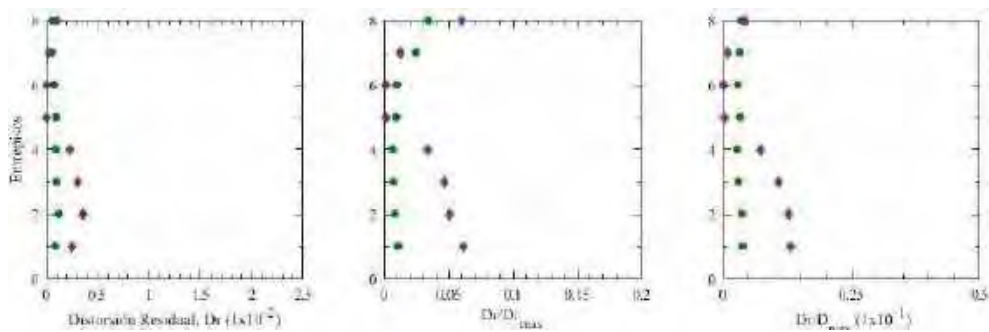


Figura F.119. Distorsiones residuales, registros de aceleración DR16-A

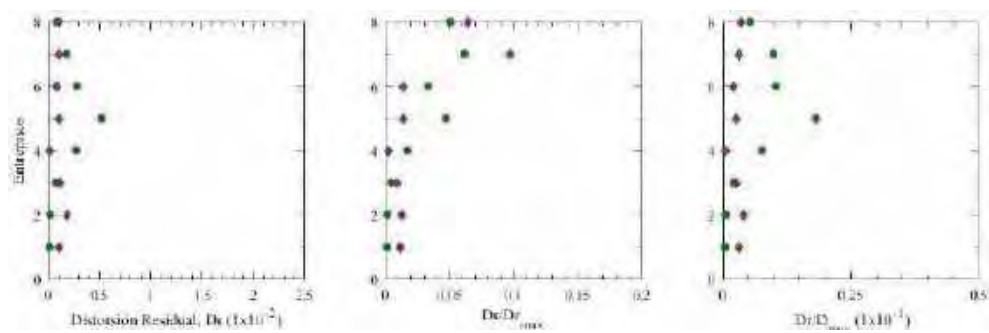


Figura F.120. Distorsiones residuales, registros de aceleración DR16-B

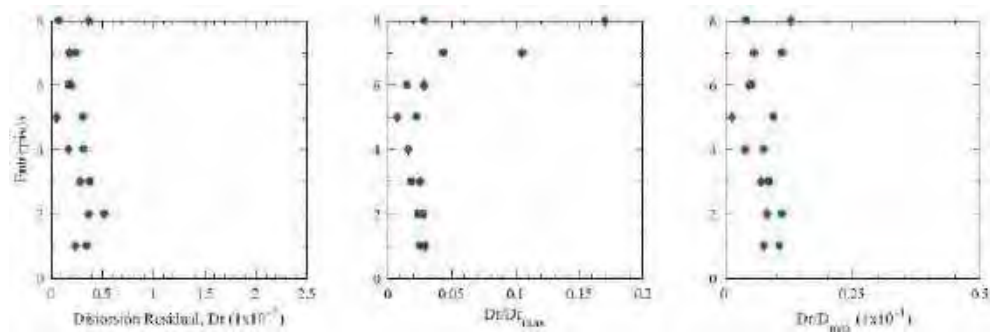


Figura F.121. Distorsiones residuales, registros de aceleración EO30-A

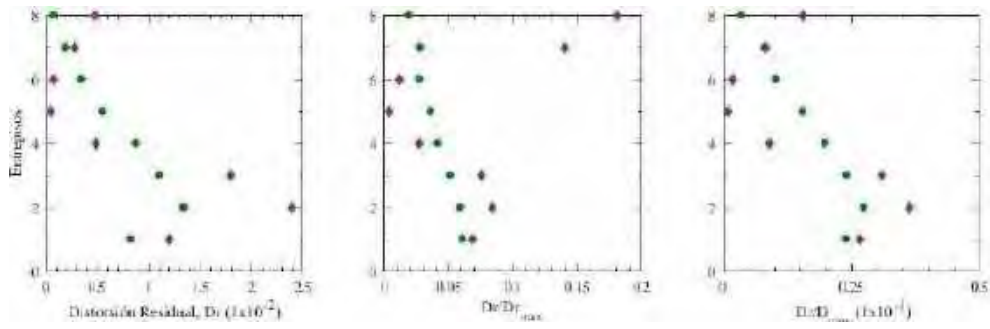


Figura F.122. Distorsiones residuales, registros de aceleración EO30-B

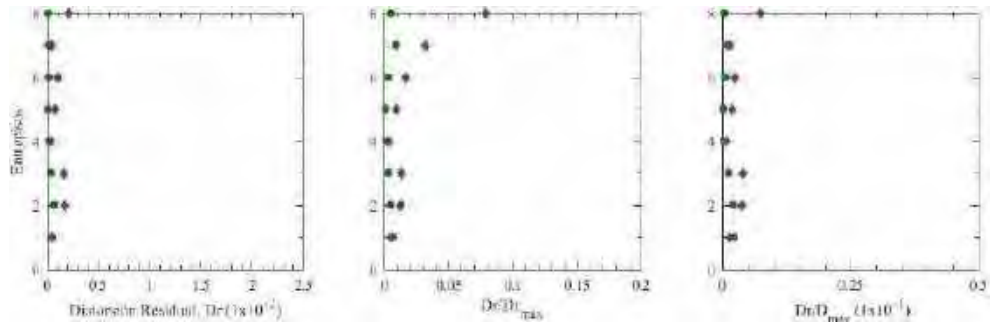


Figura F.123. Distorsiones residuales, registros de aceleración GR27-A

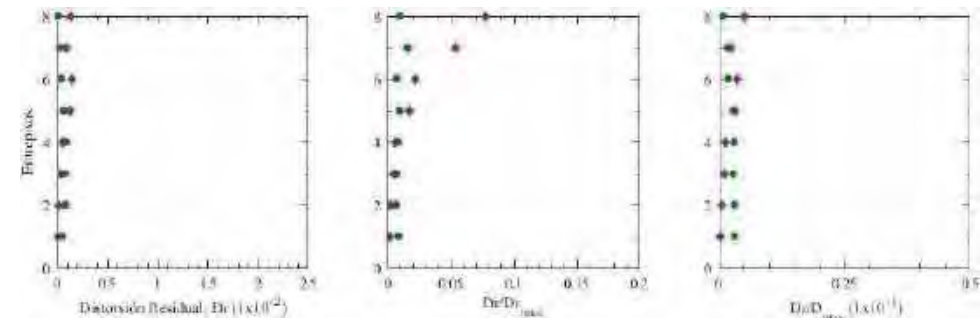


Figura F.124. Distorsiones residuales, registros de aceleración GR27-B

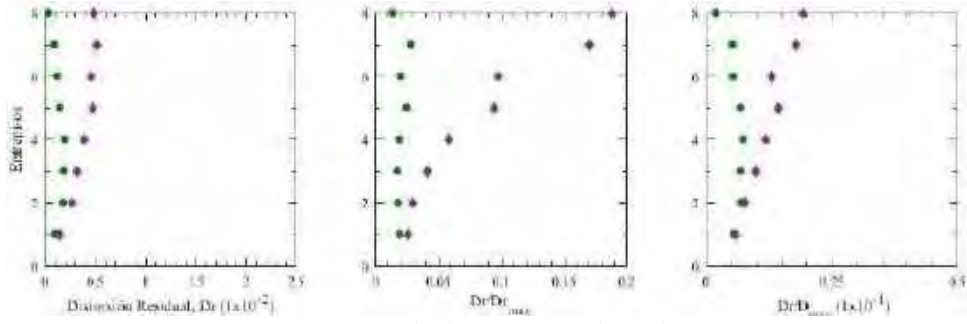


Figura F.125. Distorsiones residuales, registros de aceleración SXVI-A (1985)

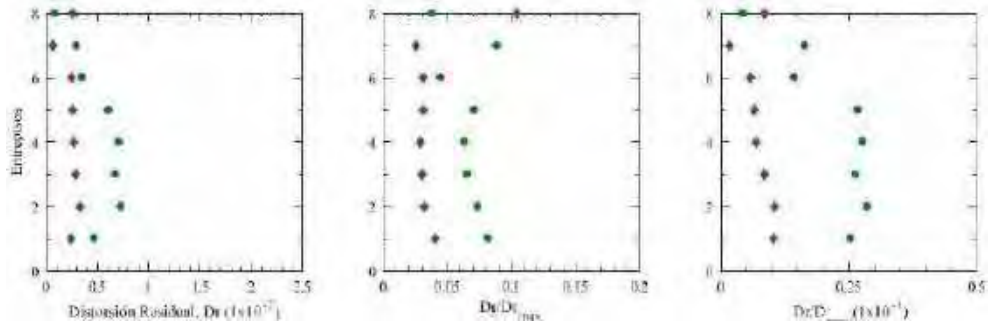


Figura F.126. Distorsiones residuales, registros de aceleración SXVI-B (1985)

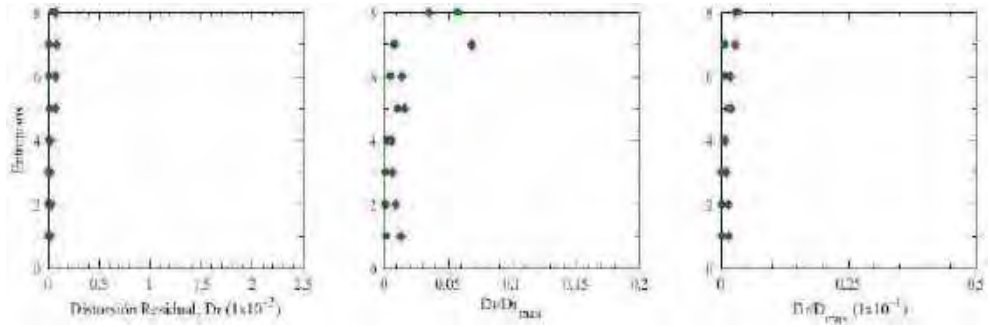


Figura F.127. Distorsiones residuales, registros de aceleración GR27-A (2017)

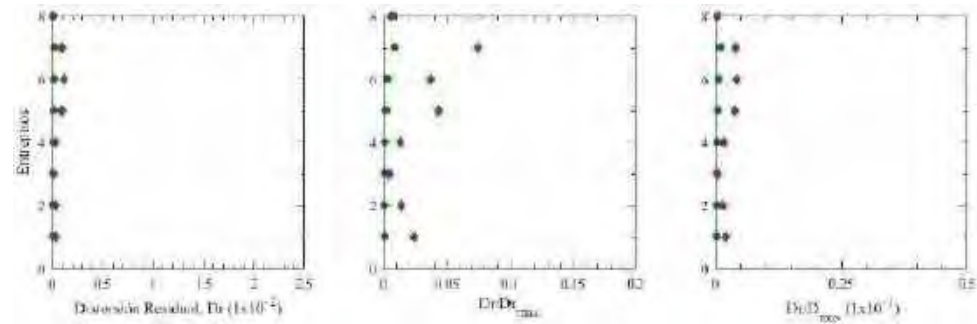


Figura F.128. Distorsiones residuales, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.2 Base Flexible

F.2.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS

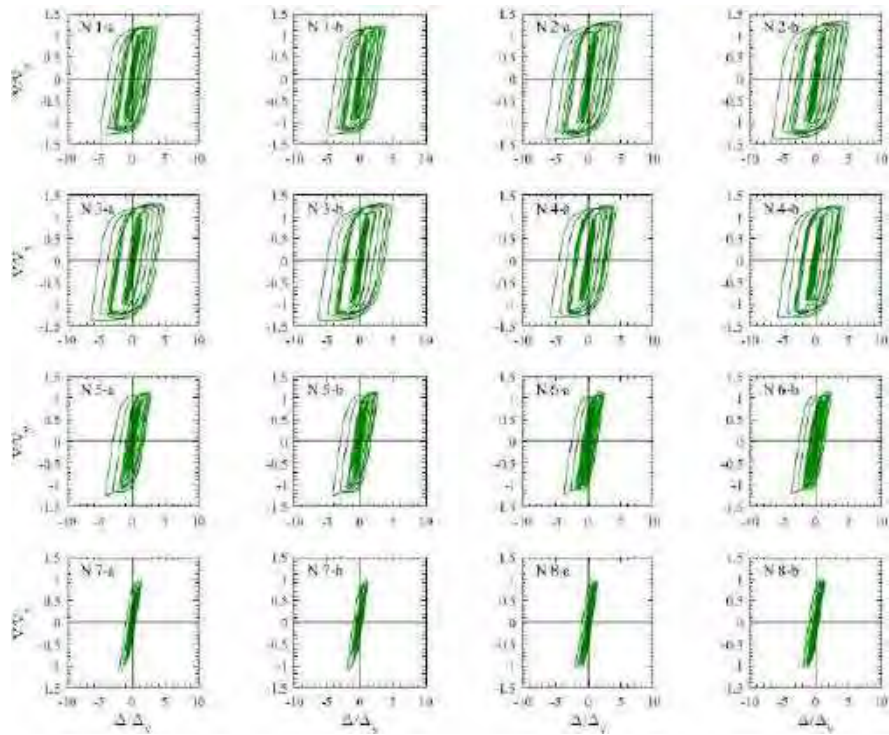


Figura F.129. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración AO24-A

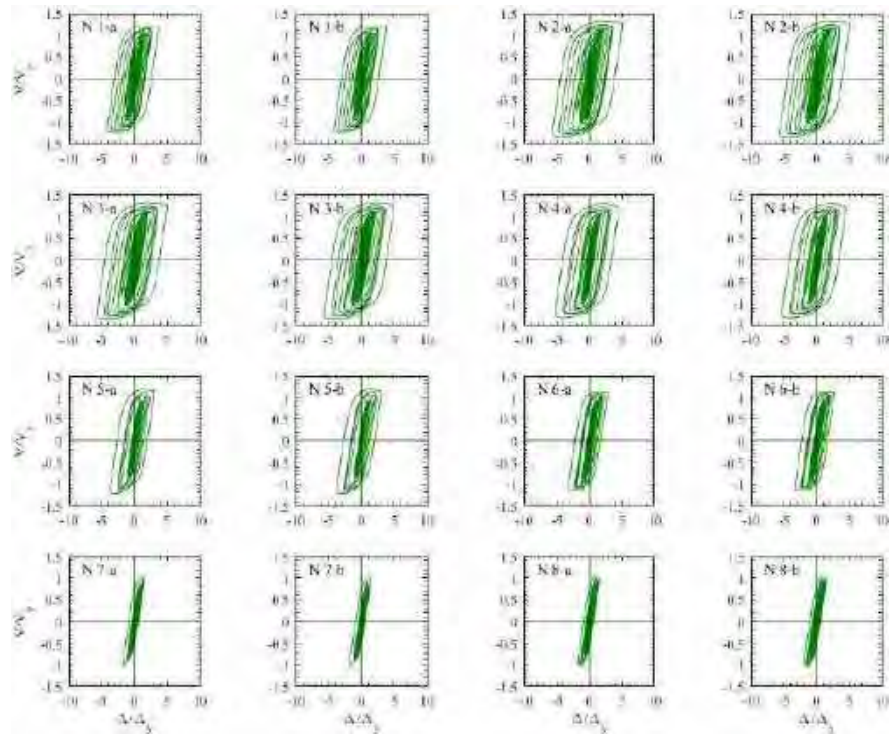


Figura F.130. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración AO24-B

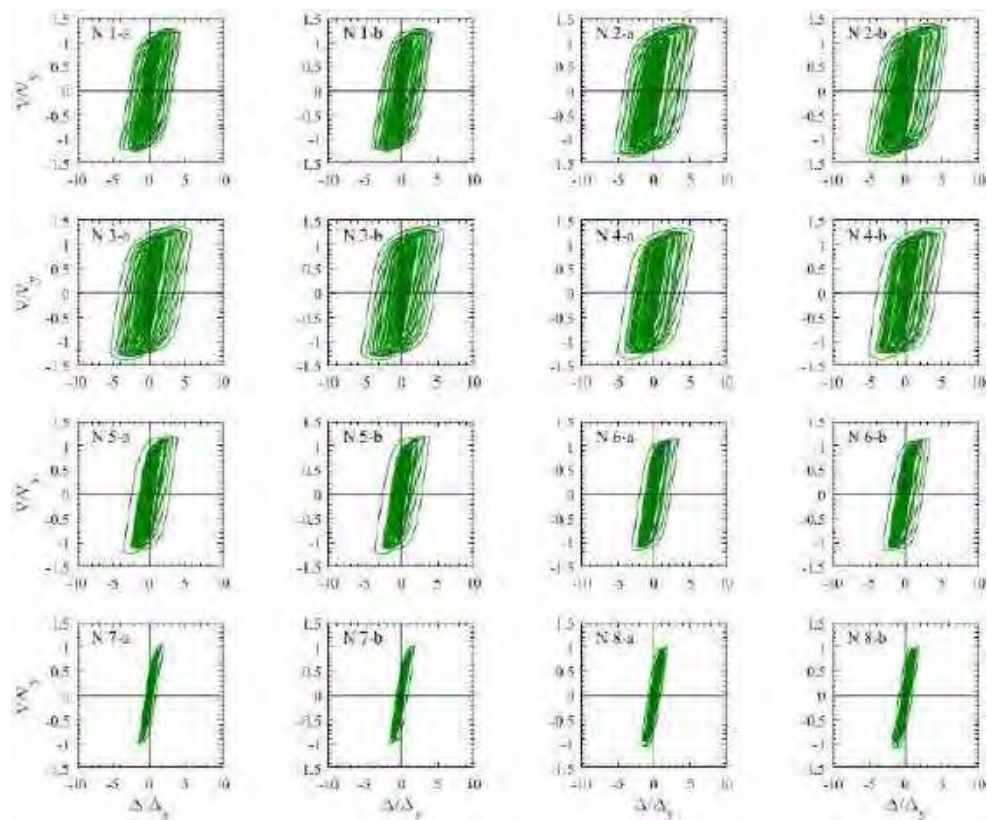


Figura F.131. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CLRT-A

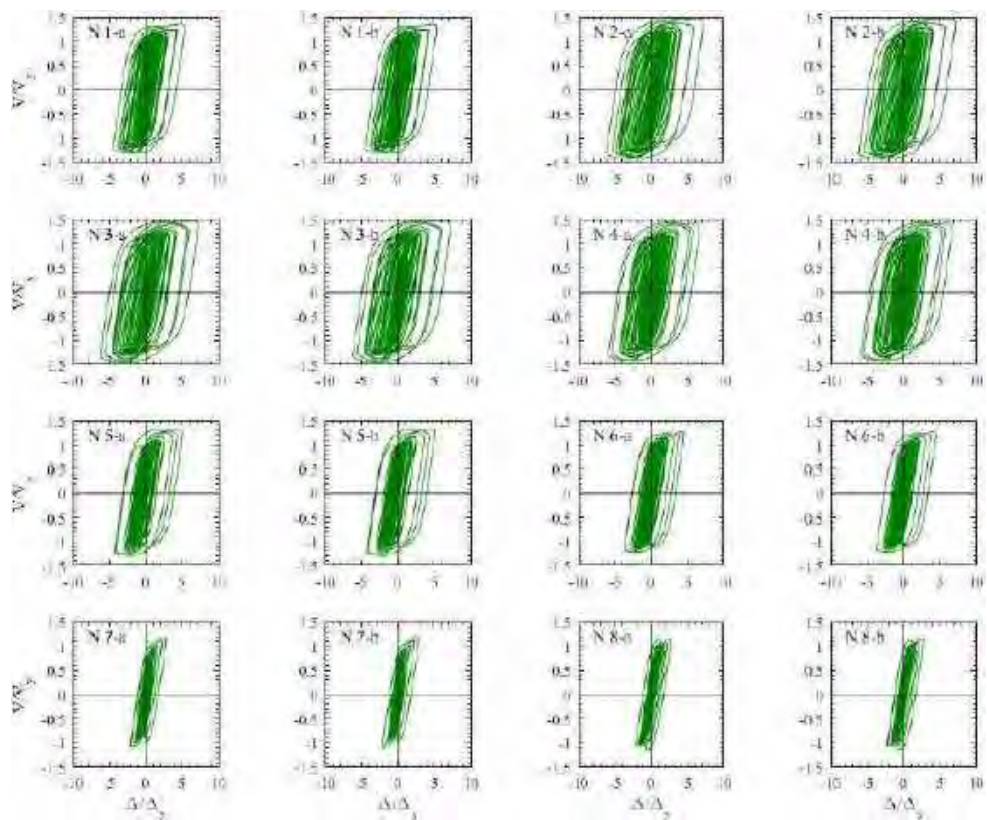


Figura F.132. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CLRT-B

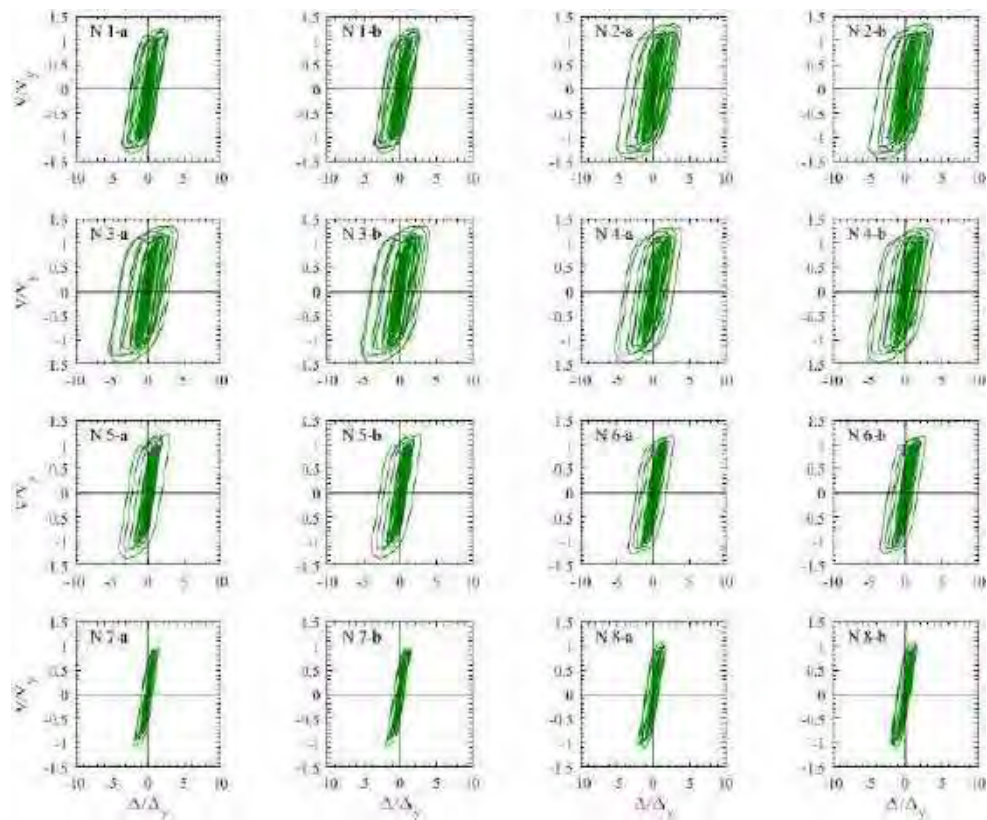


Figura F.133. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración COYS-A

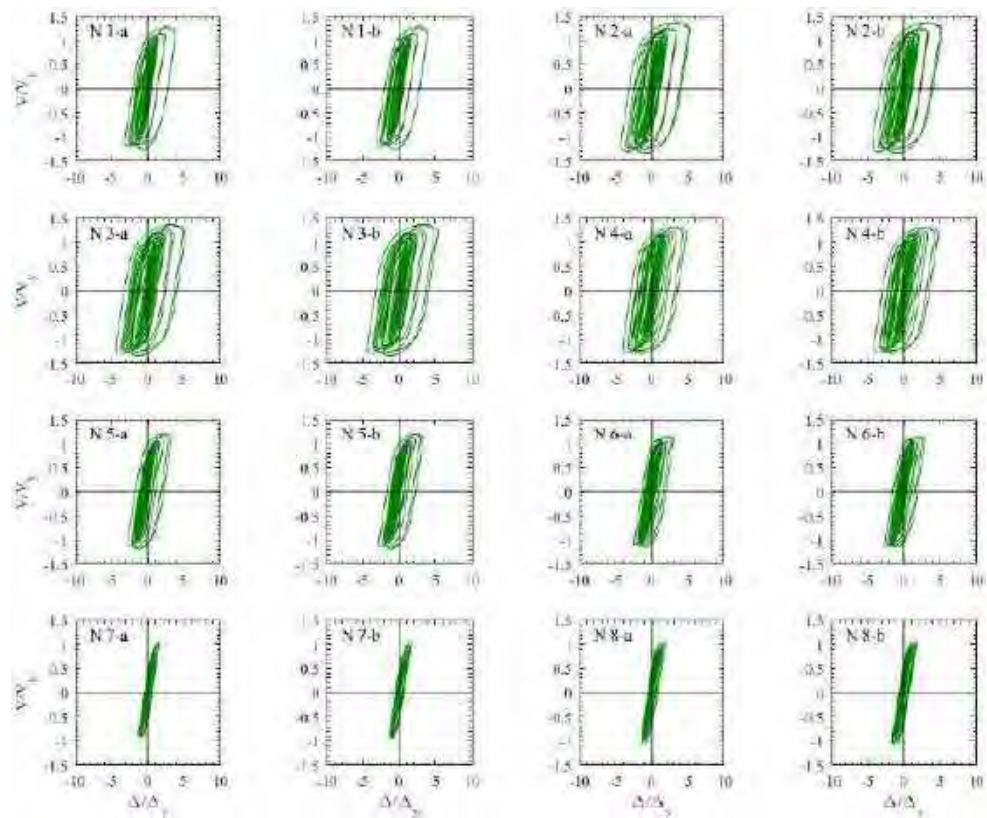


Figura F.134. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración COYS-B

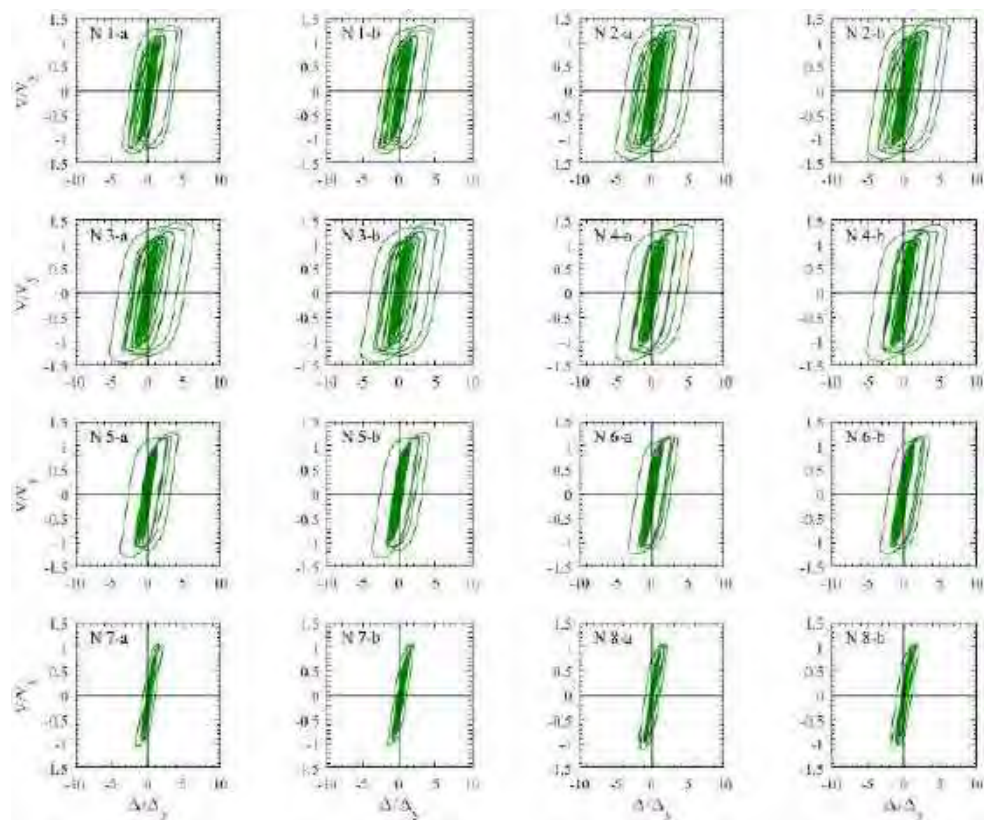


Figura F.135. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DR16-A

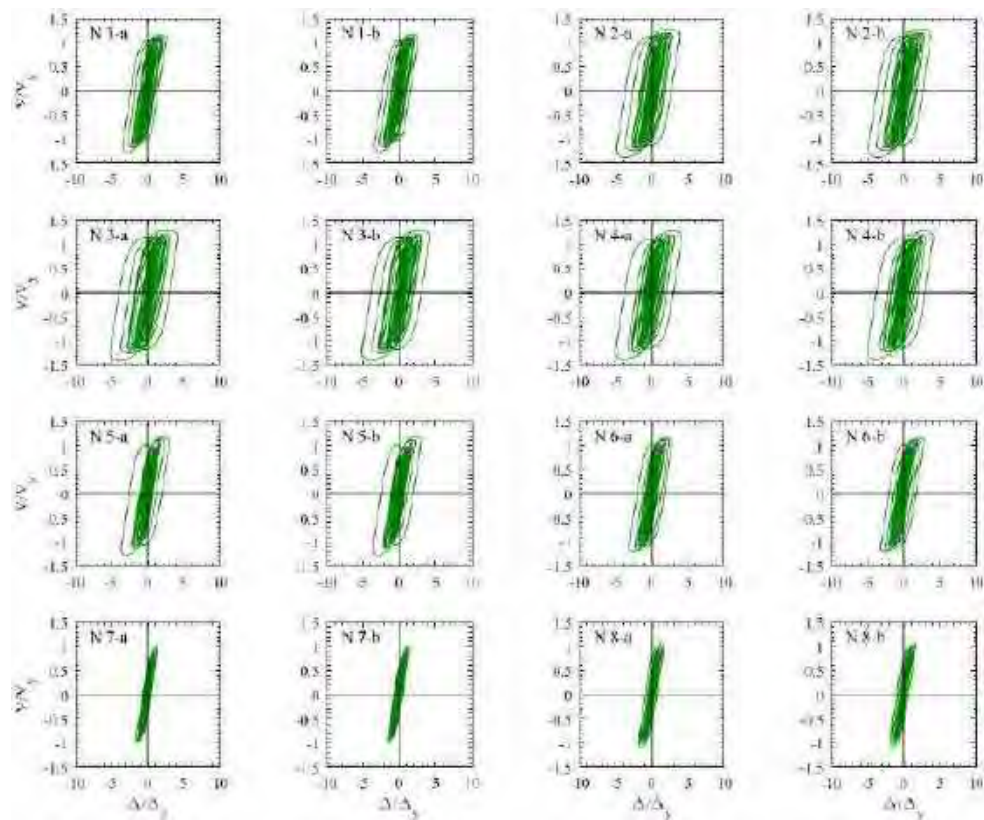


Figura F.136. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DR16-B

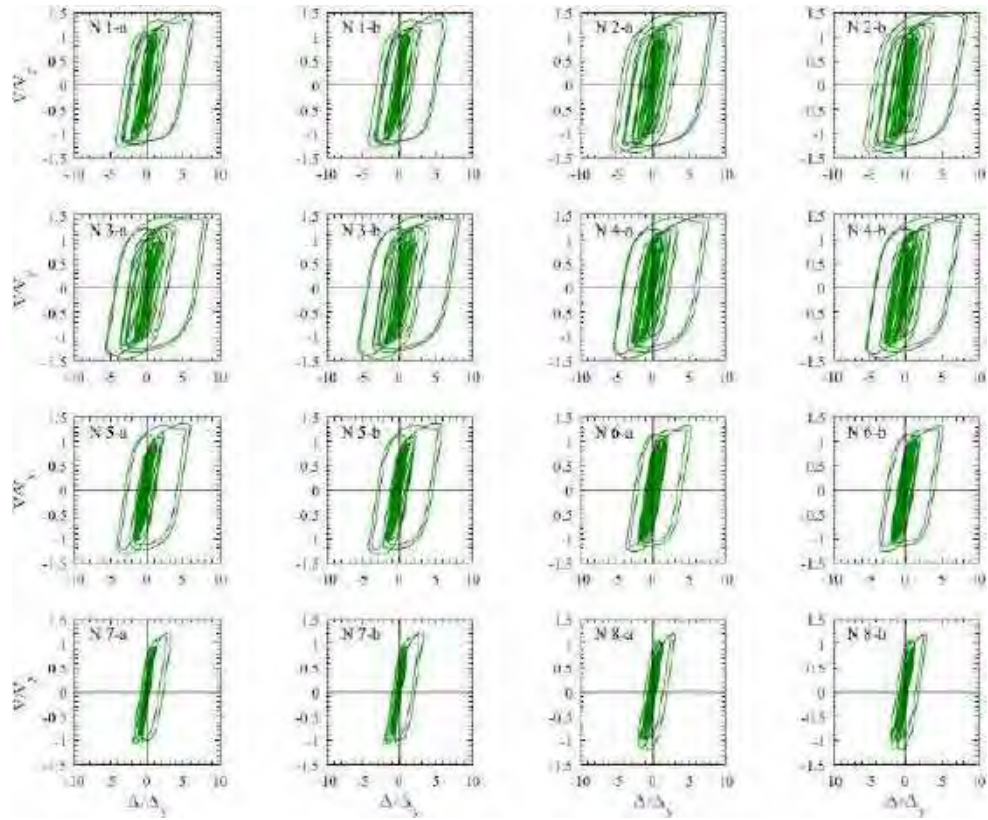


Figura F.137. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración EO30-A

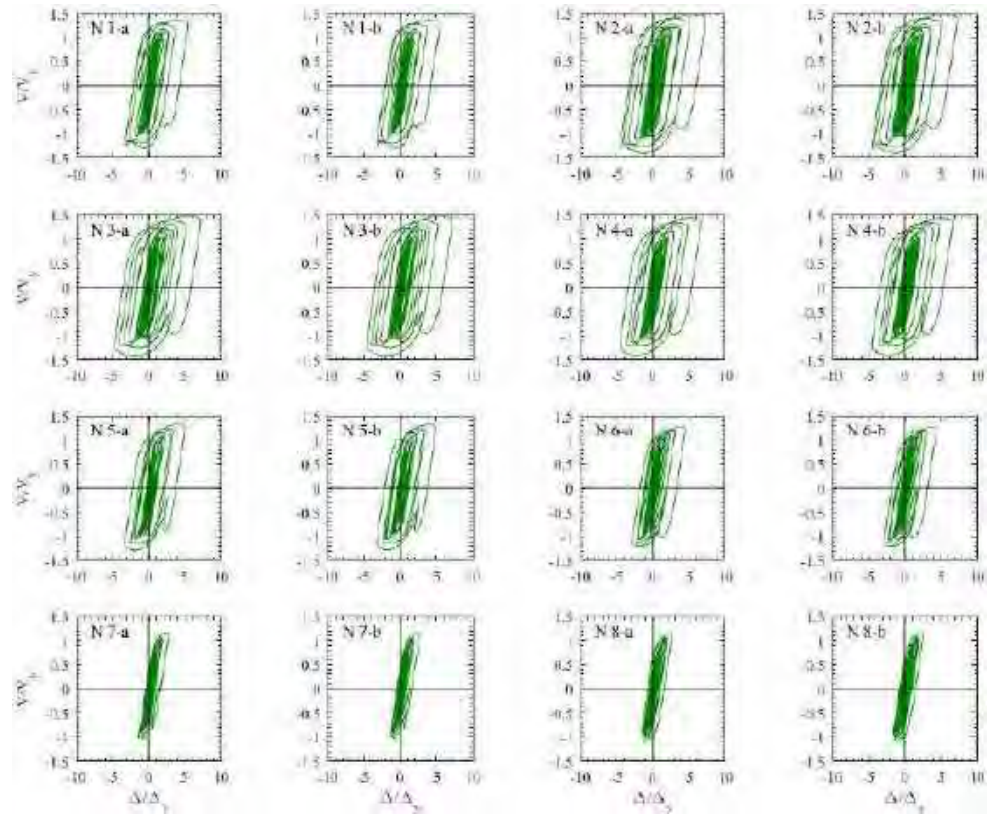


Figura F.138. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración EO30-B

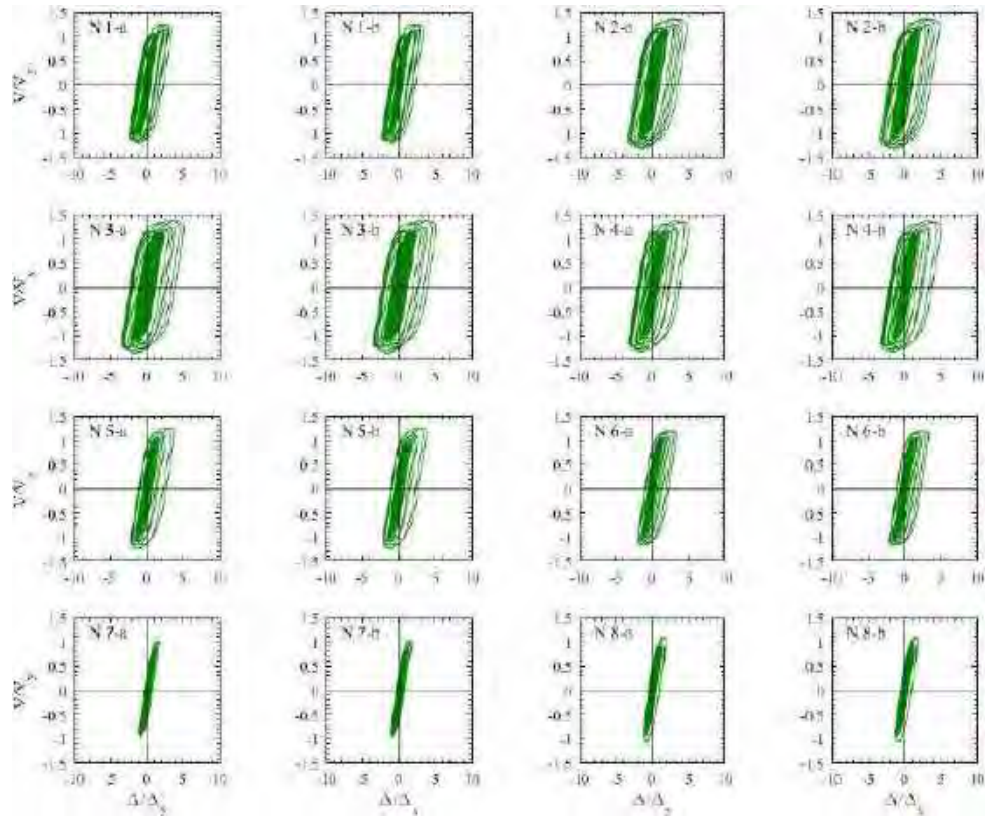


Figura F.139. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración GR27-A

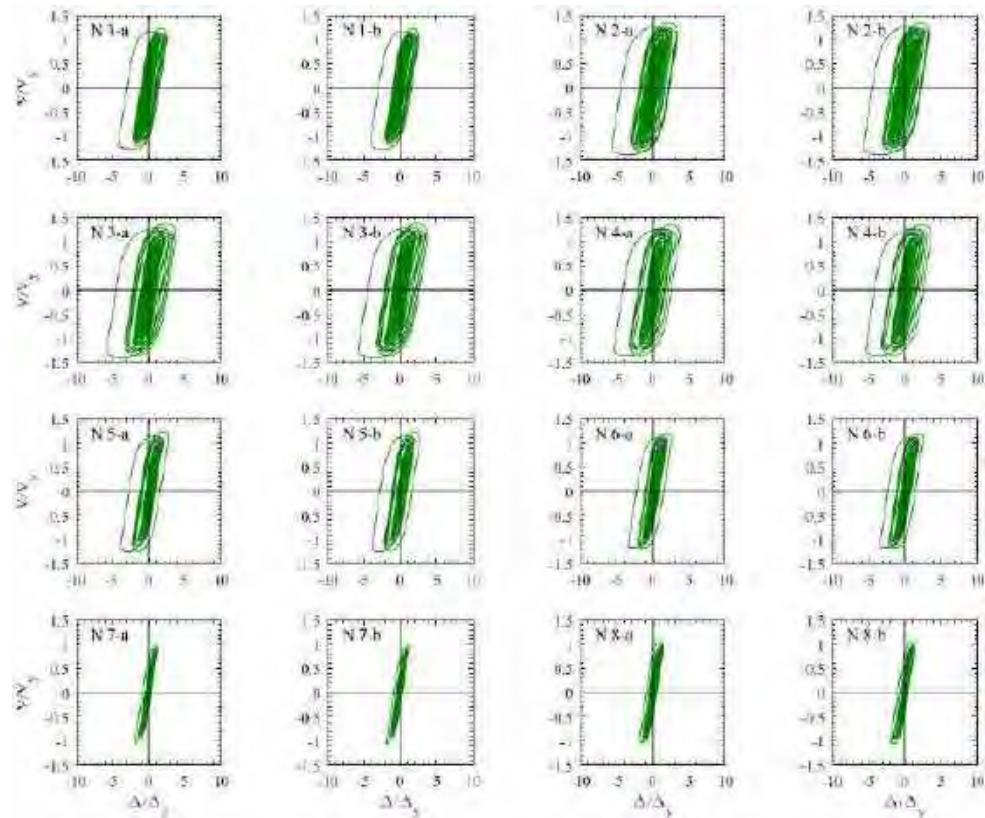


Figura F.140. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración GR27-B

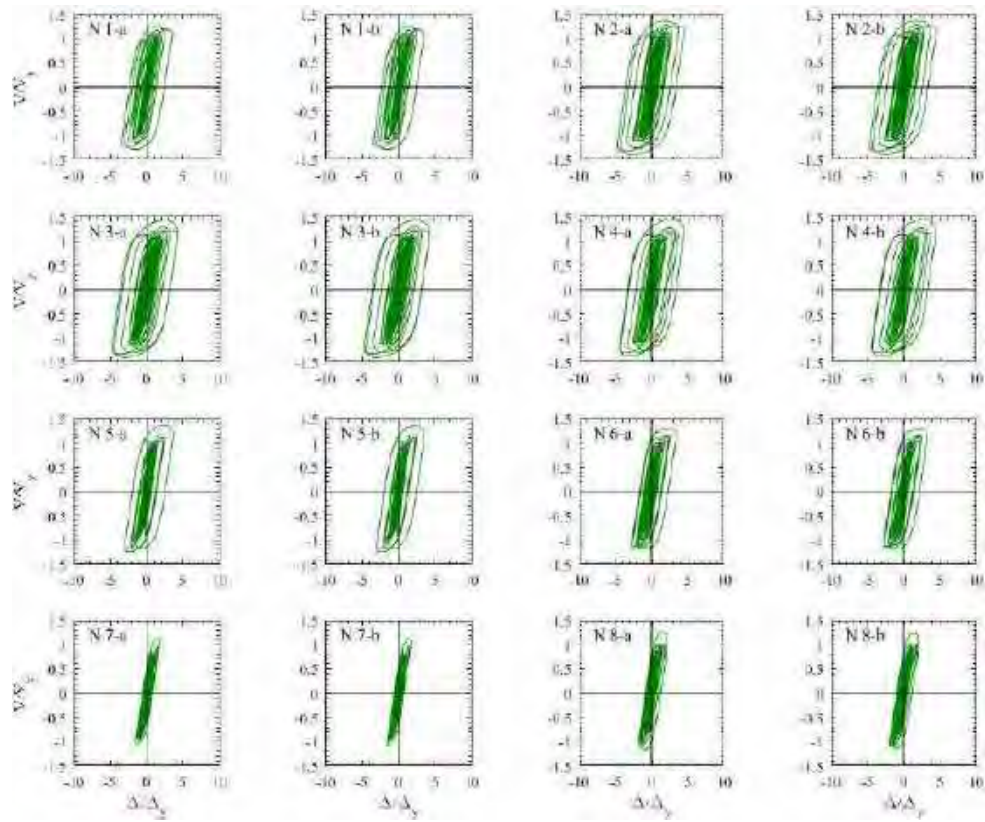


Figura F.141. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SXVI-A (1985)

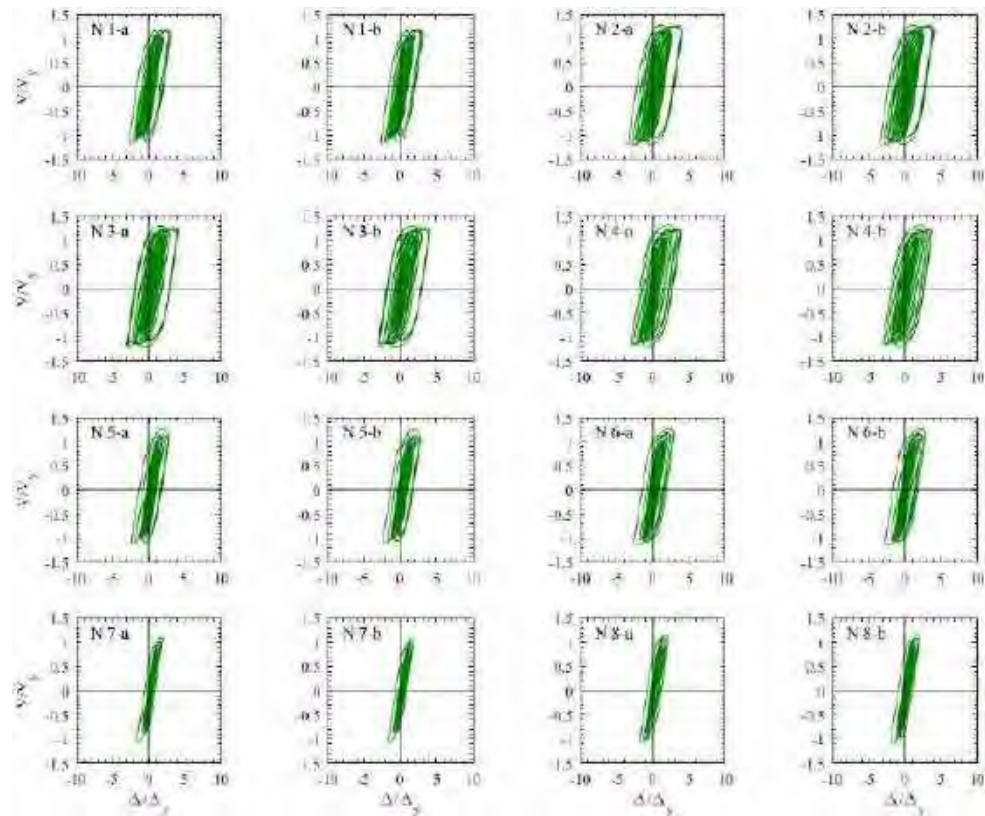


Figura F.142. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SXVI -B (1985)

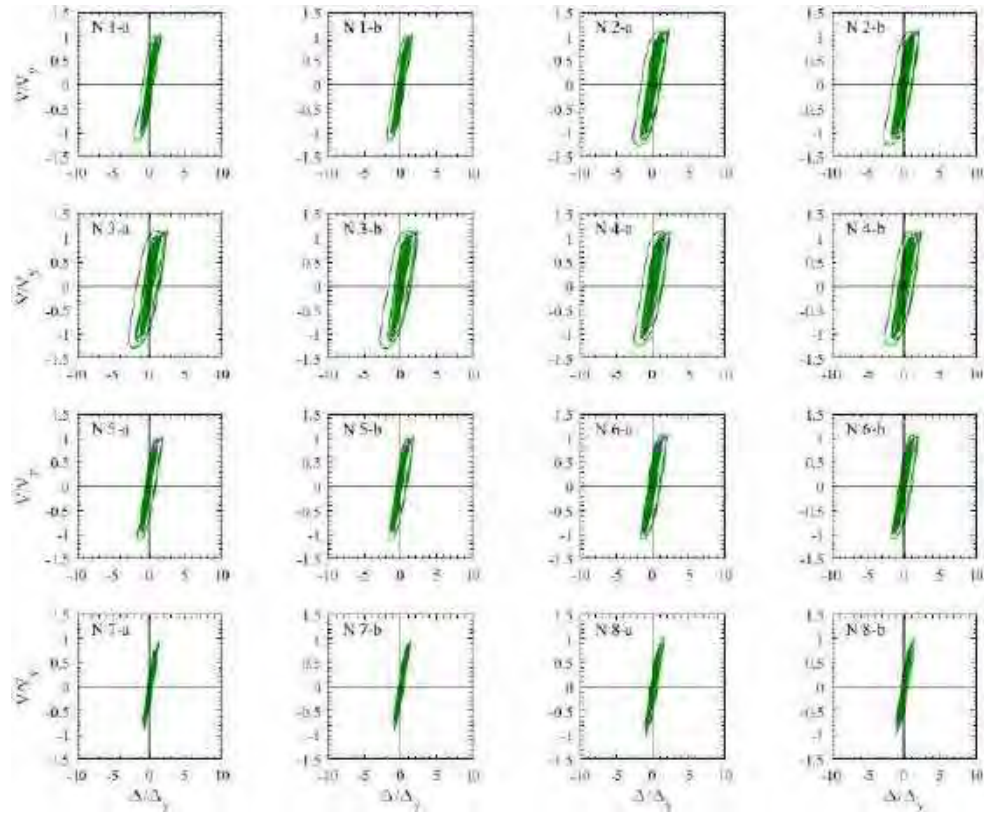


Figura F.143. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración GR27-A (2017)

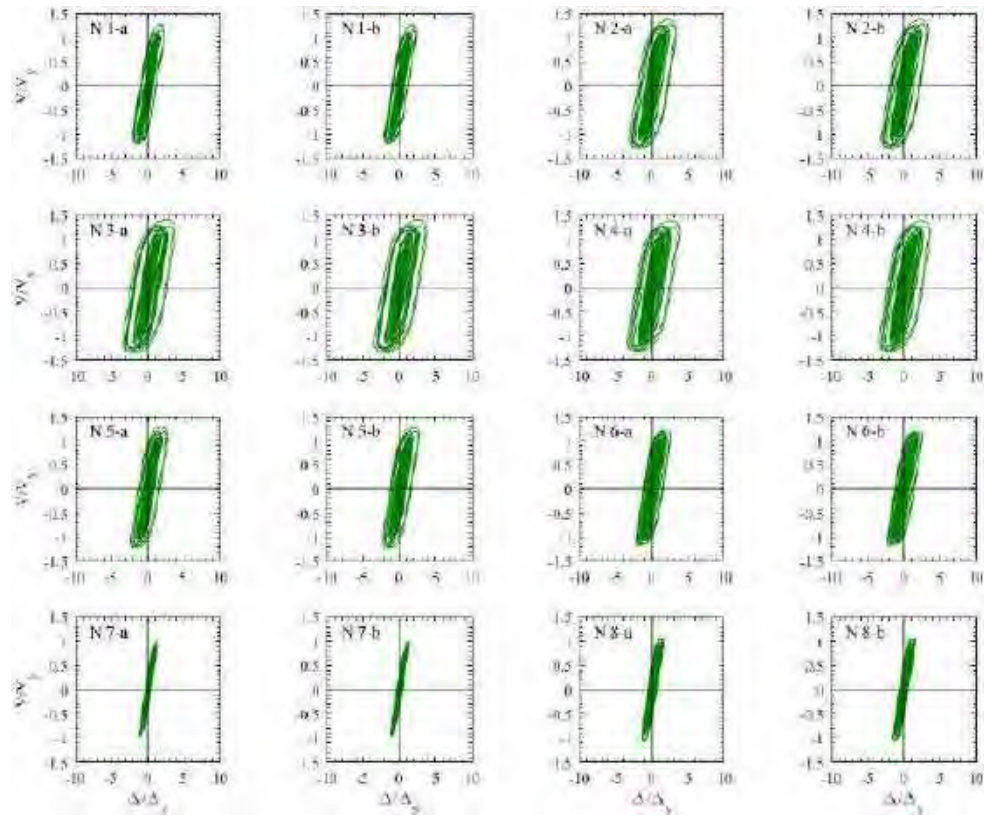


Figura F.144. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.2.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB

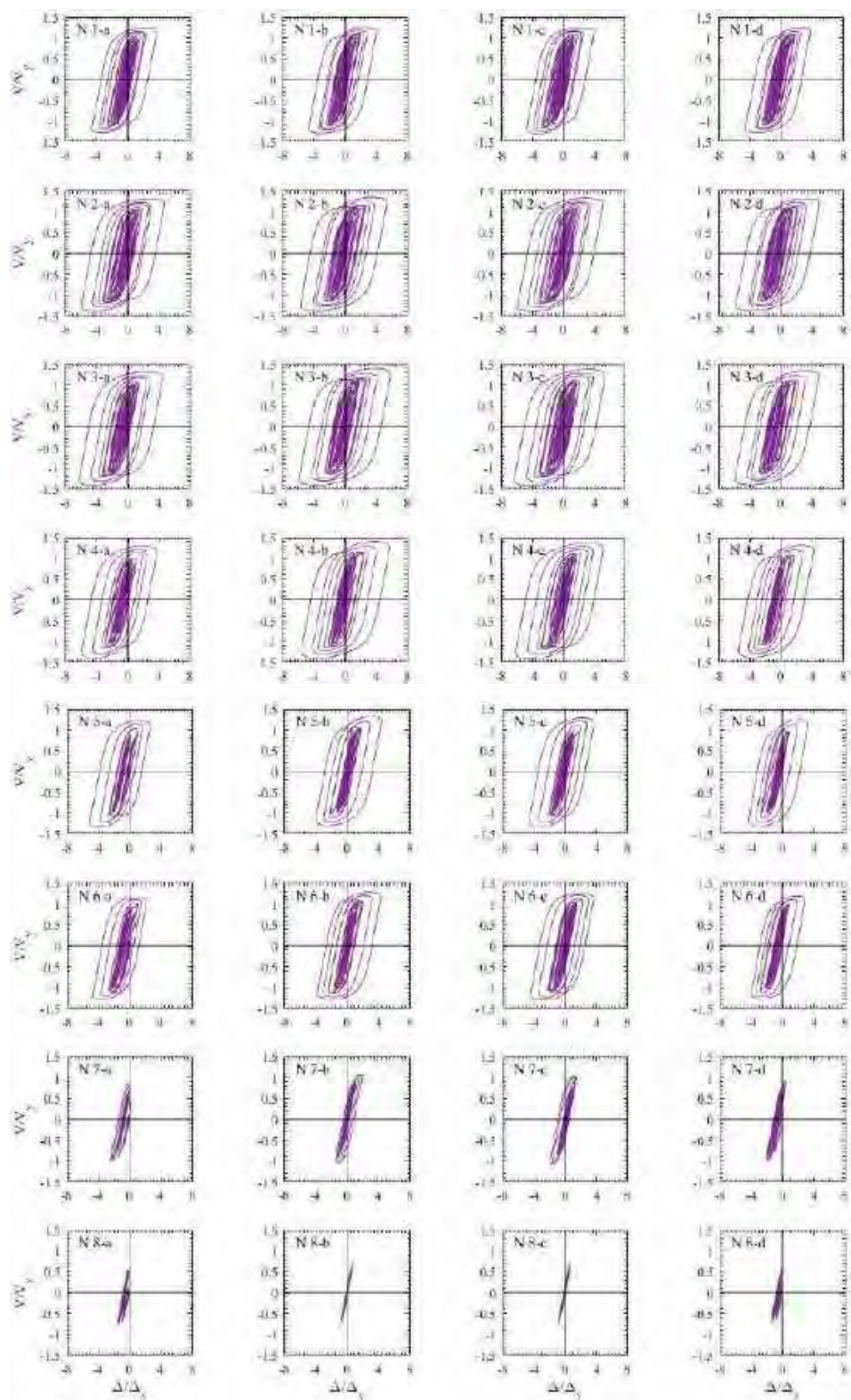


Figura F.145. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración AO24-A

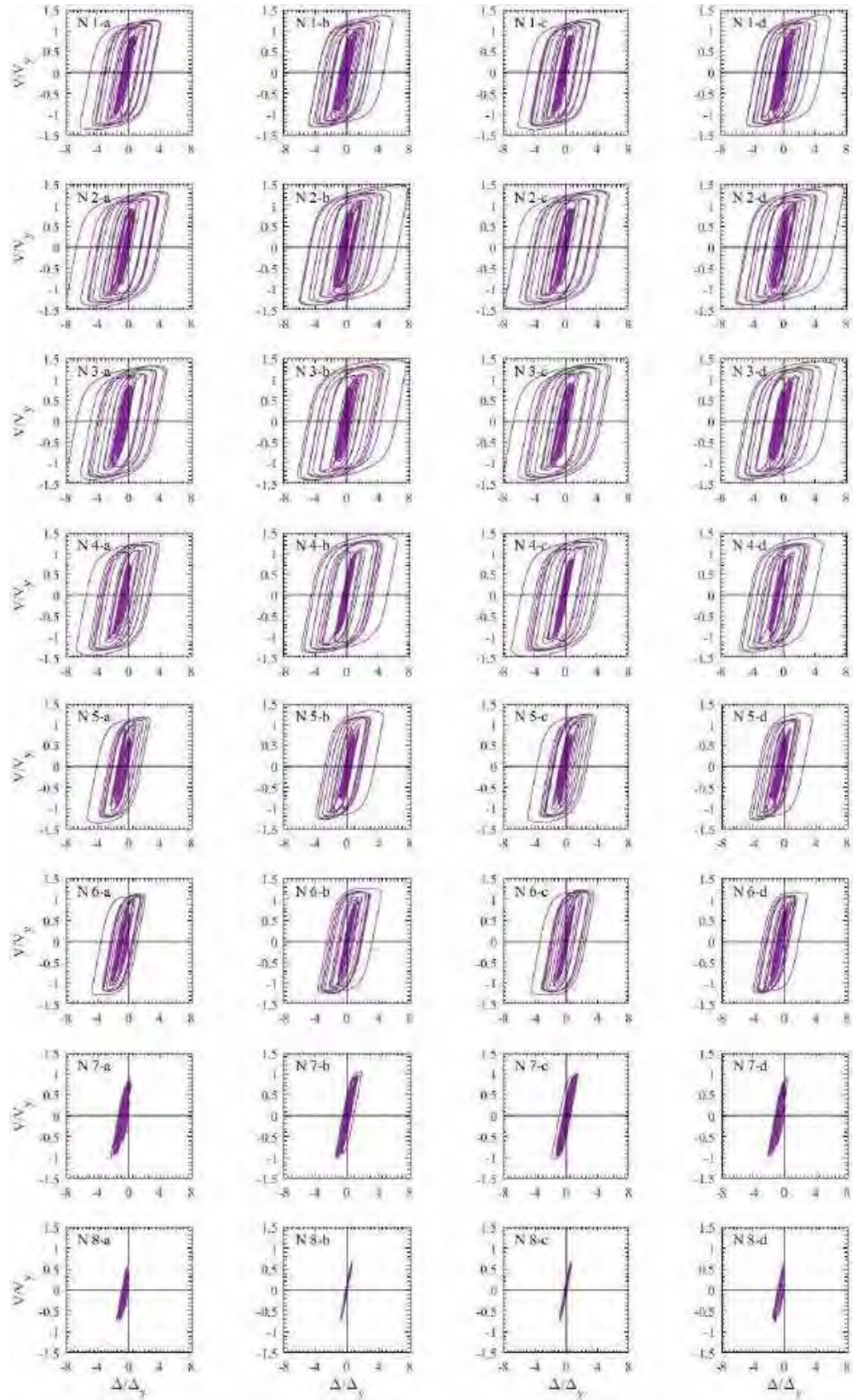


Figura F.146. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración AO24-B

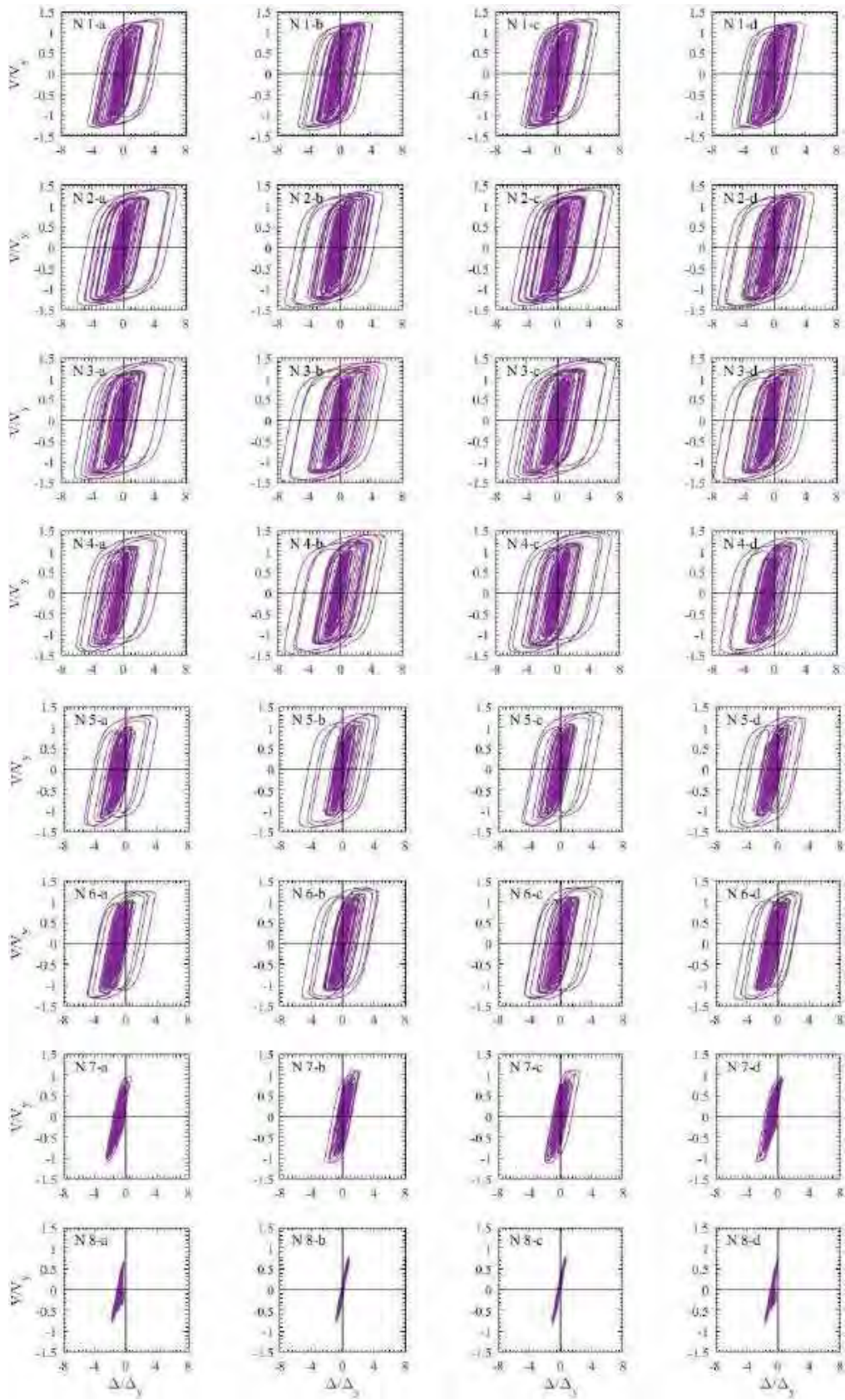


Figura F.147. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CLRT-A

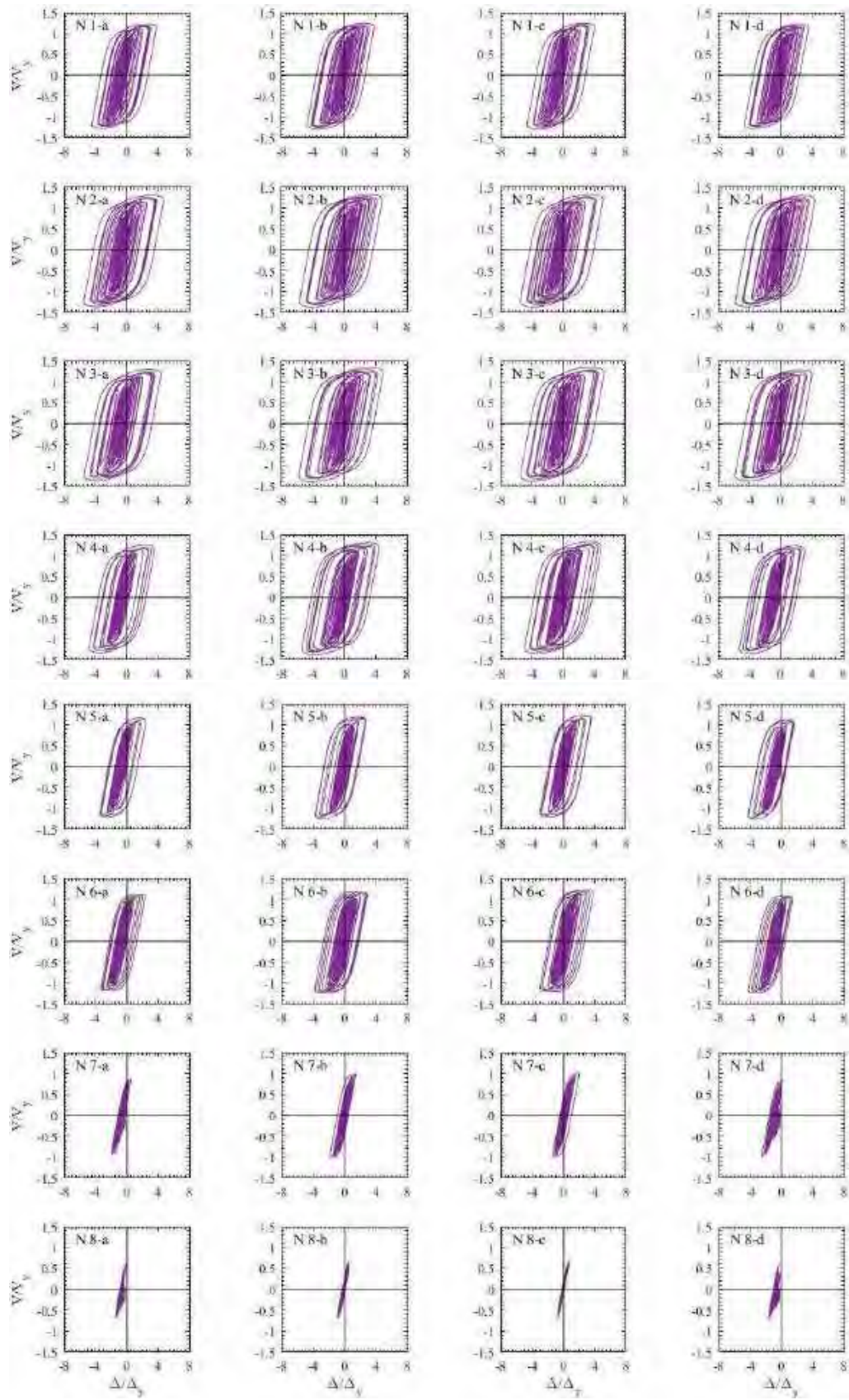


Figura F.148. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CLRT-B

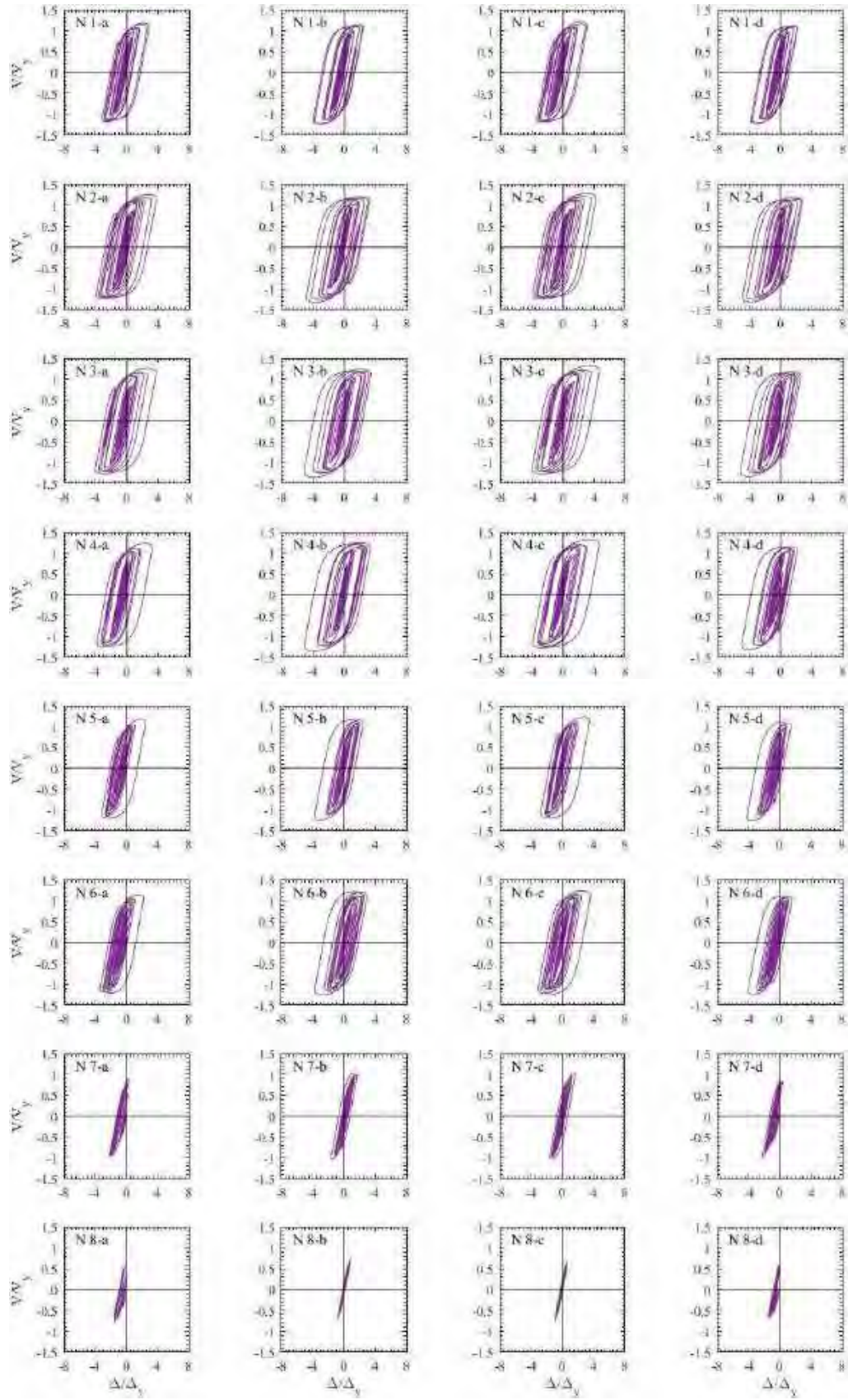


Figura F.149. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración COYS-A

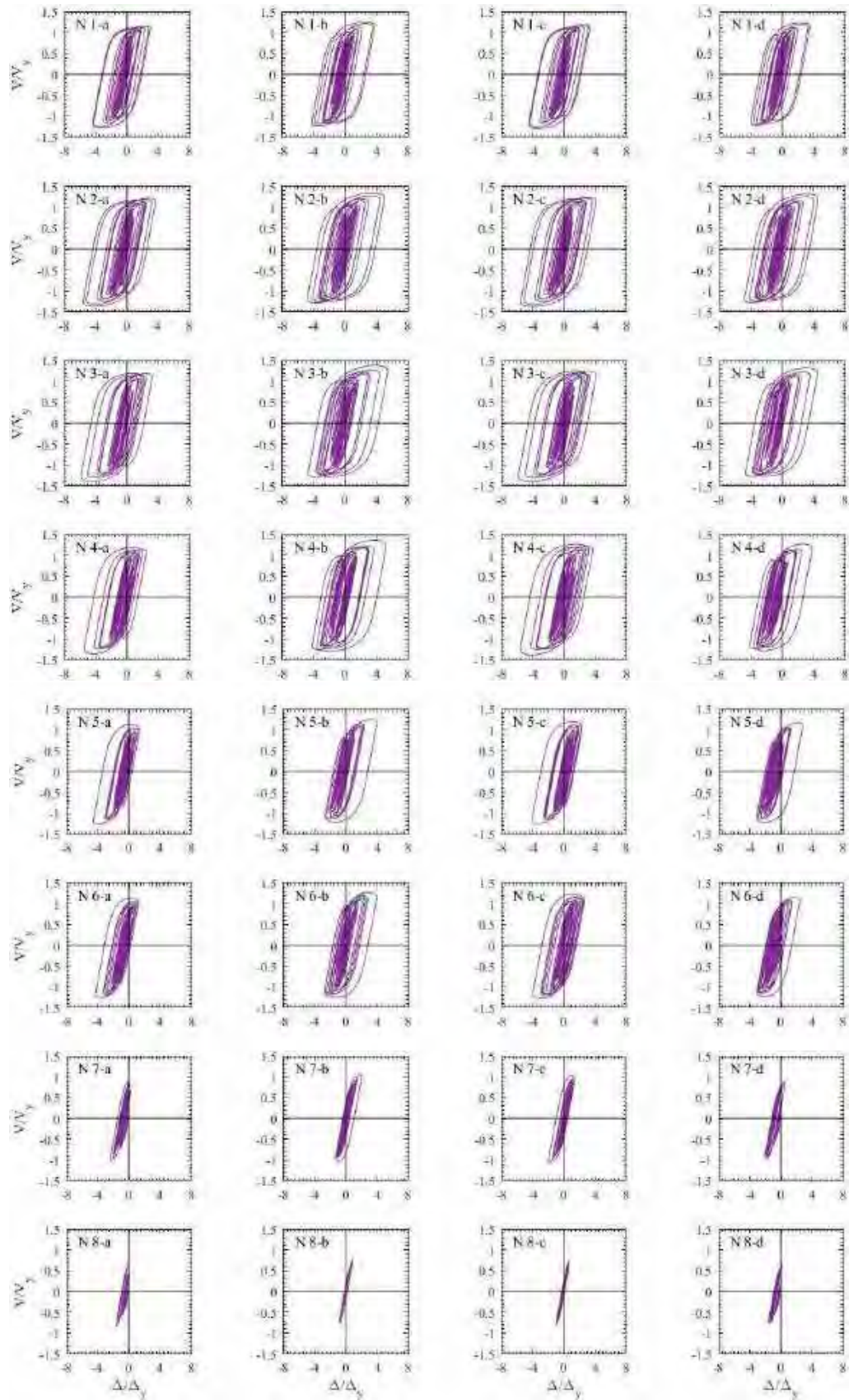


Figura F.150. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración COYS-B

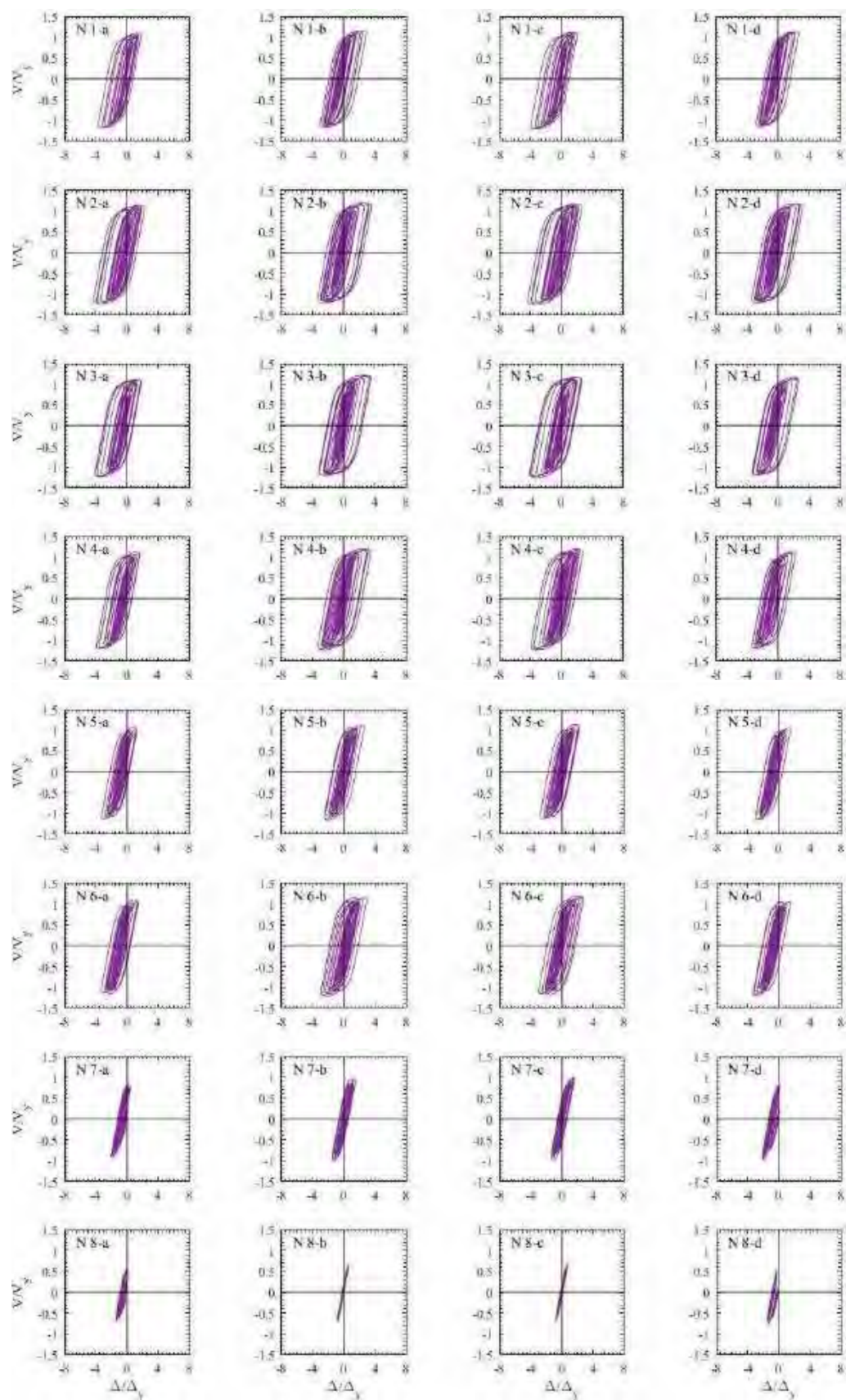


Figura F.151. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DR16-A

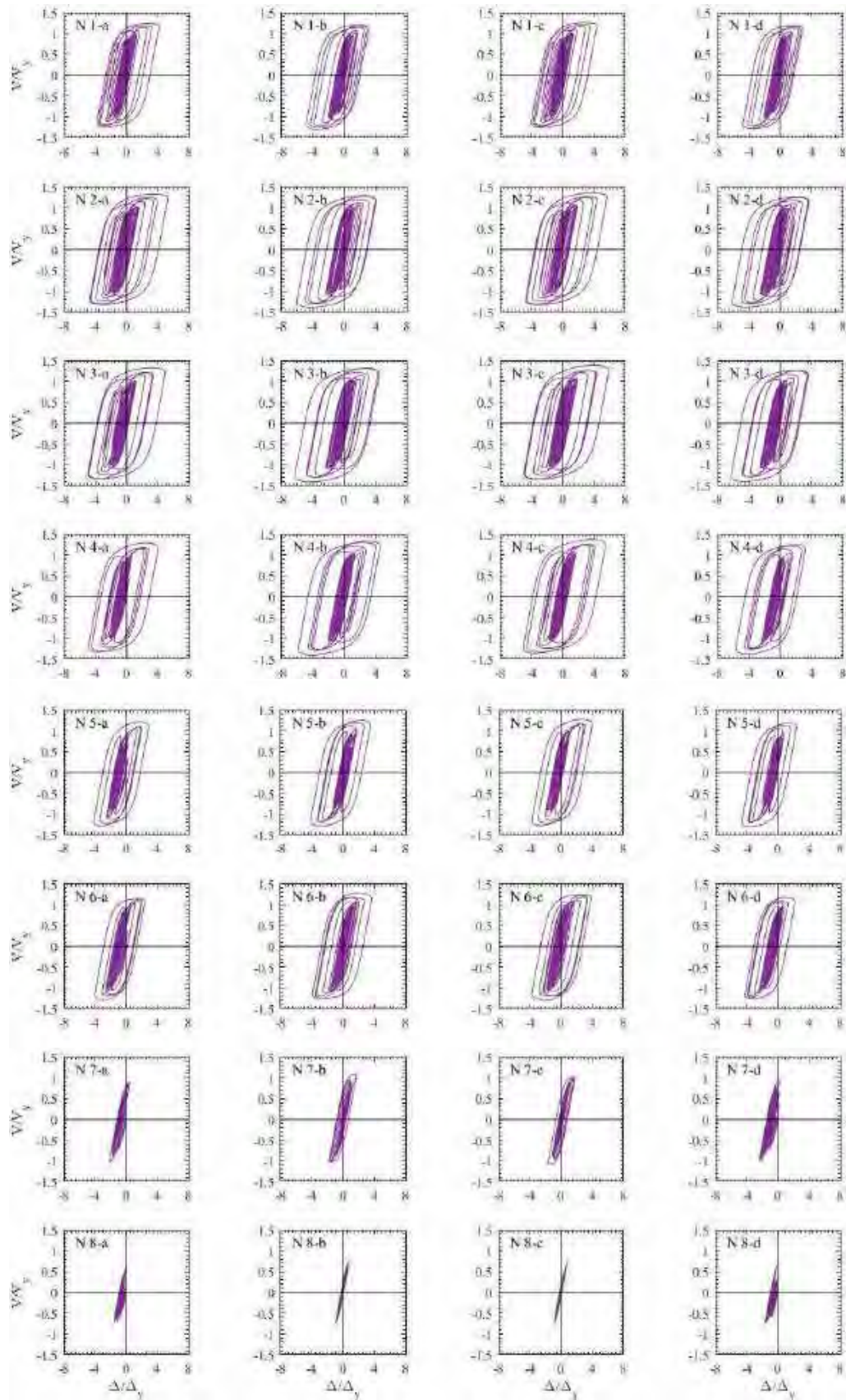


Figura F.152. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DR16-B

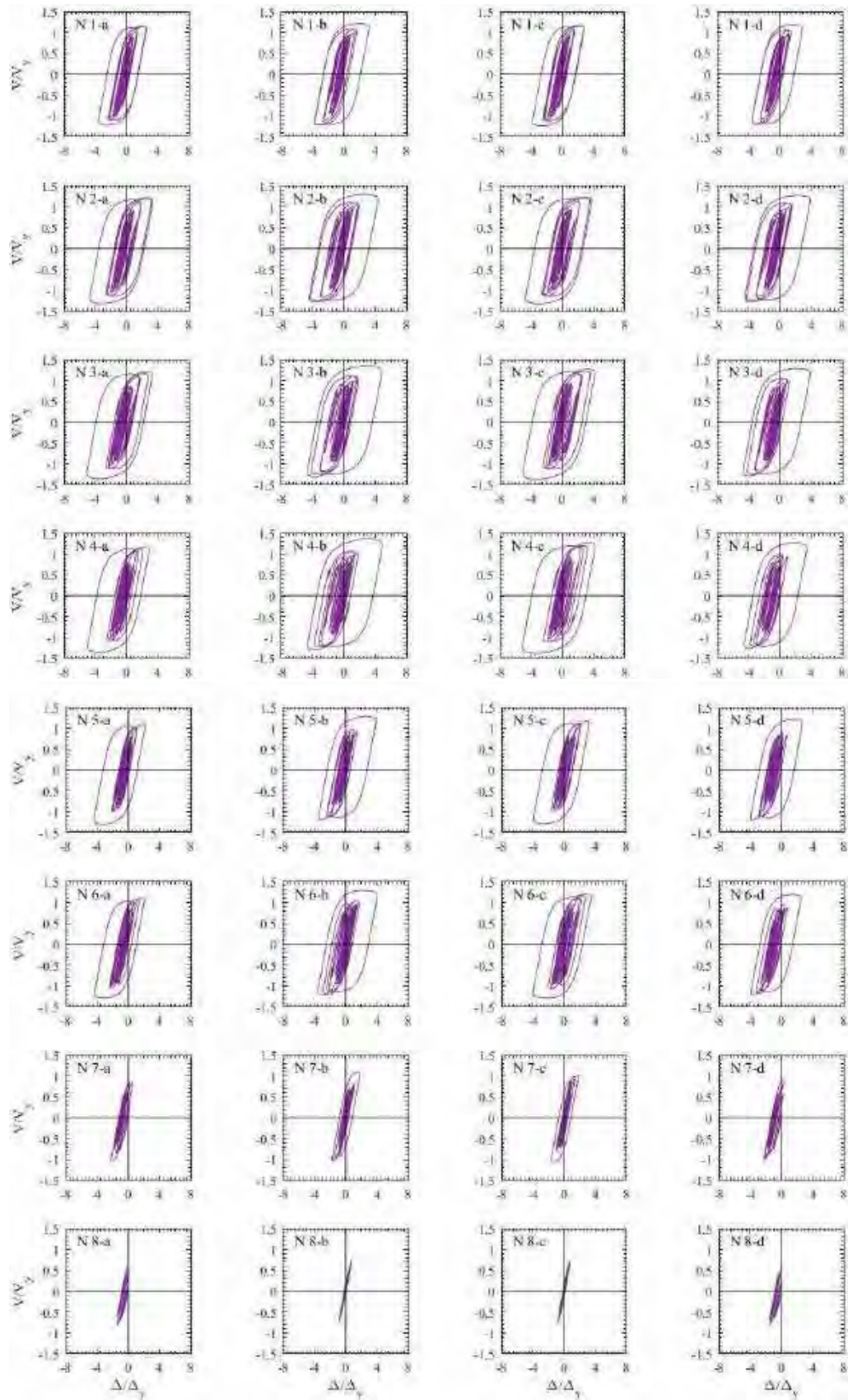


Figura F.153. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración EO30-A

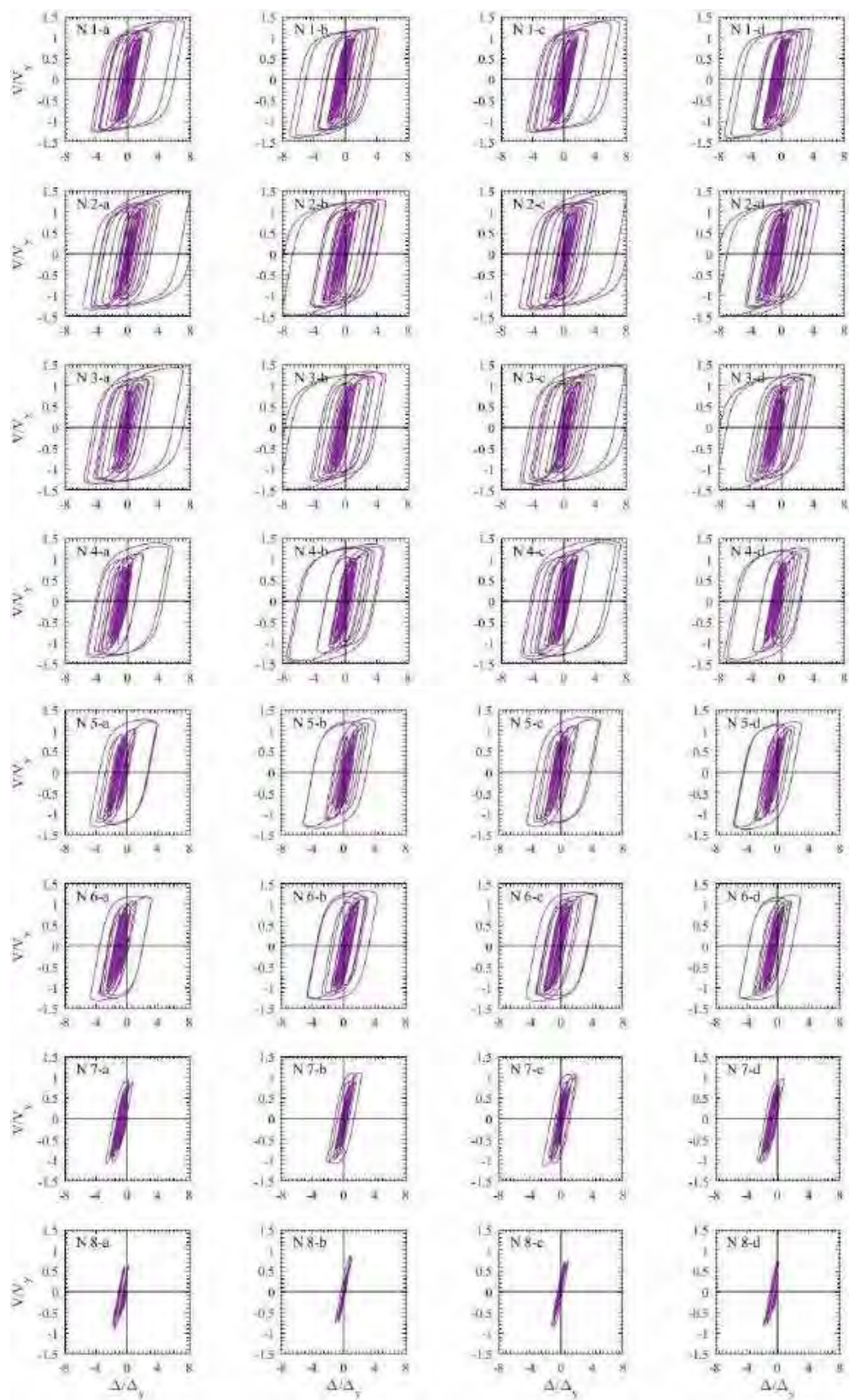


Figura F.154. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración EO30-B

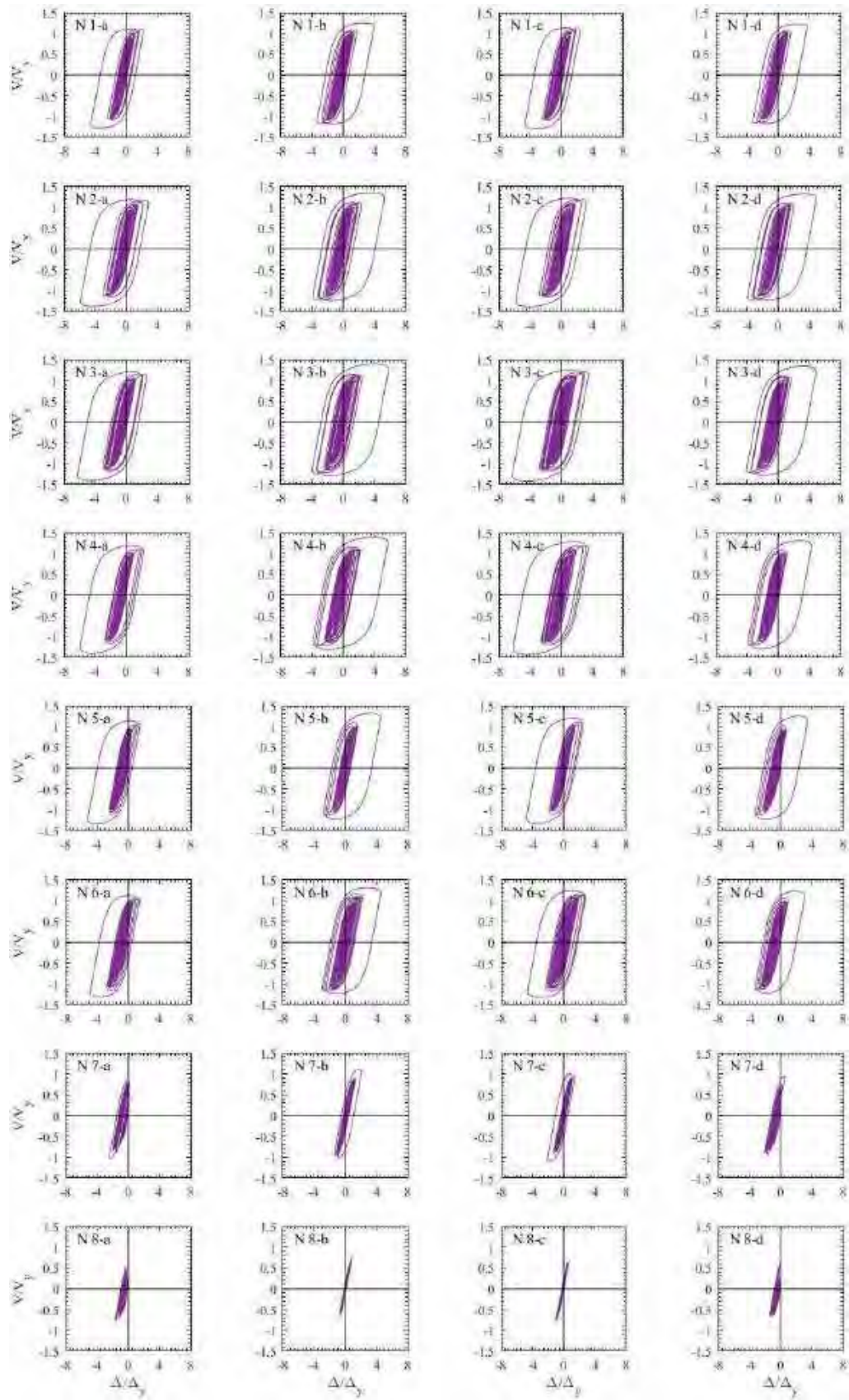


Figura F.155. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración GR27-A

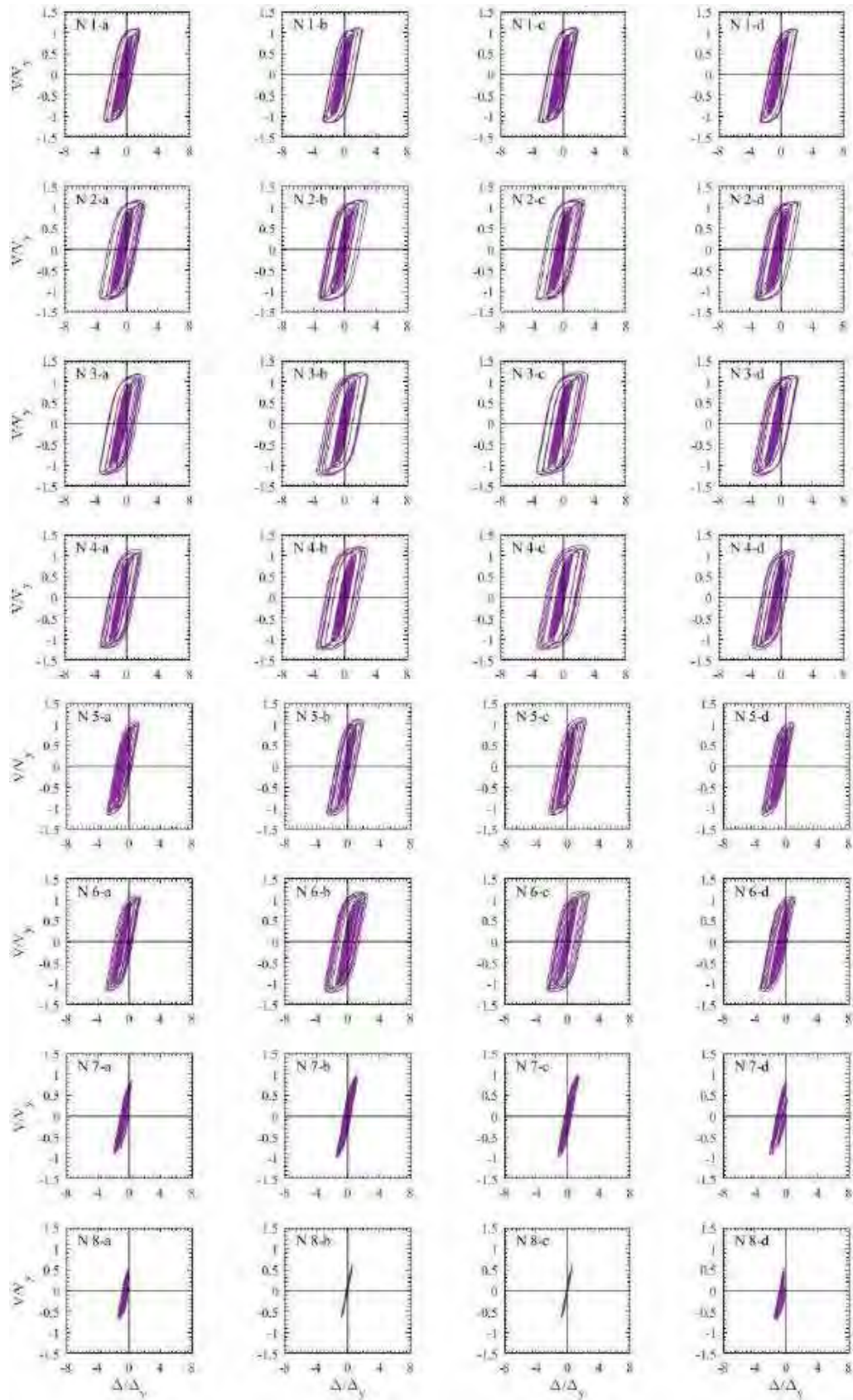


Figura F.156. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración GR27-B

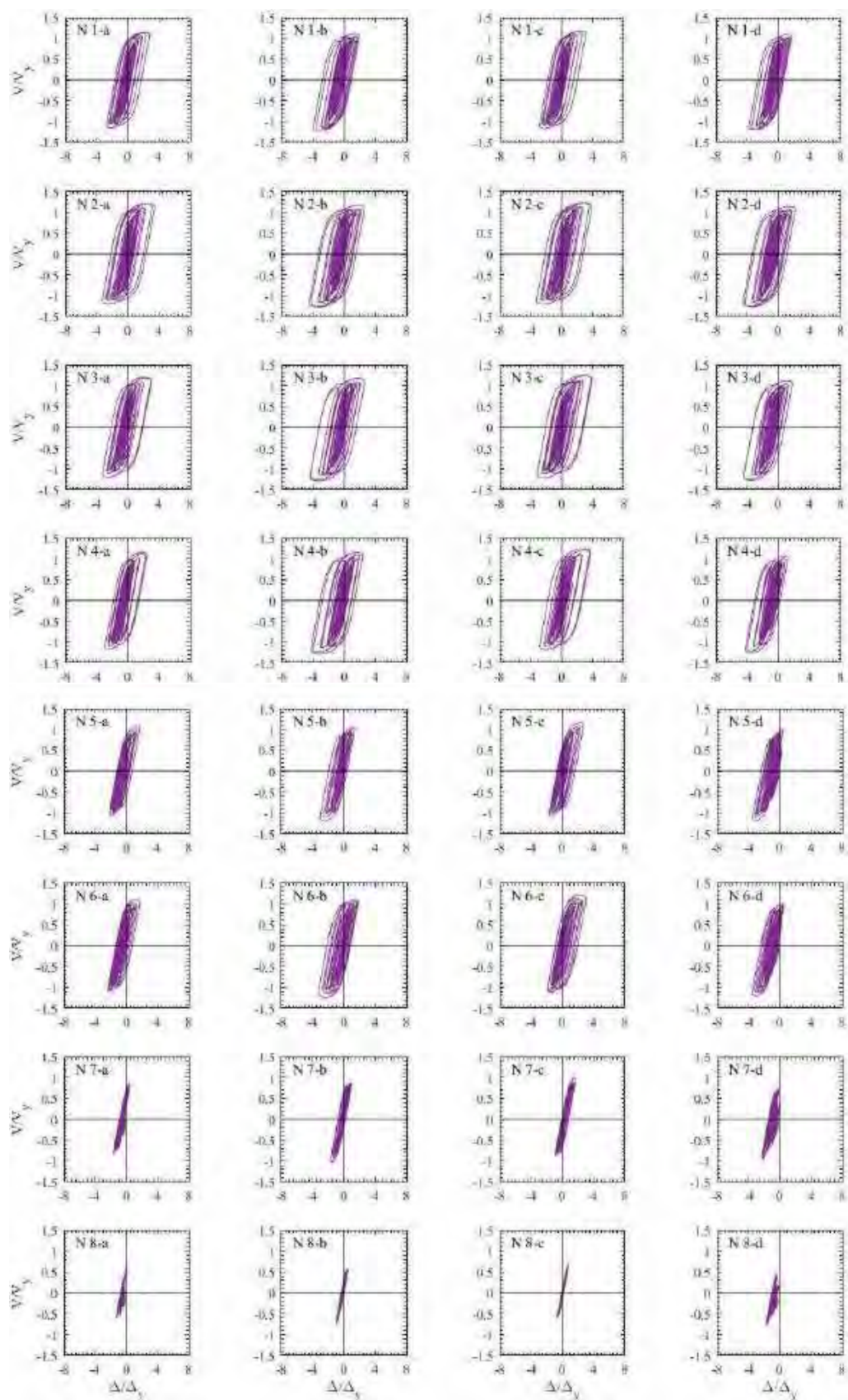


Figura F.157. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SXVI-A (1985)

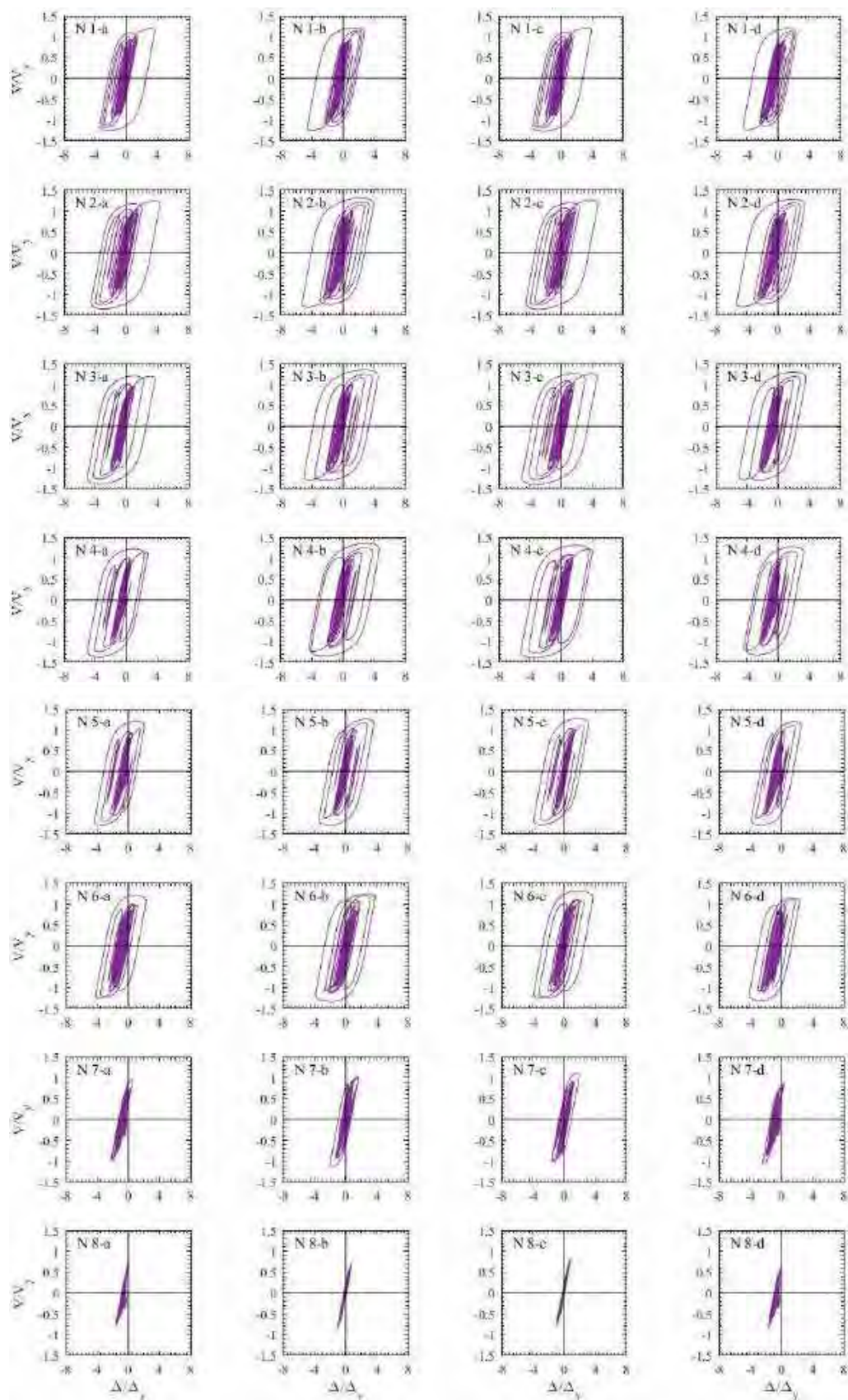


Figura F.158. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SXVI -B (1985)

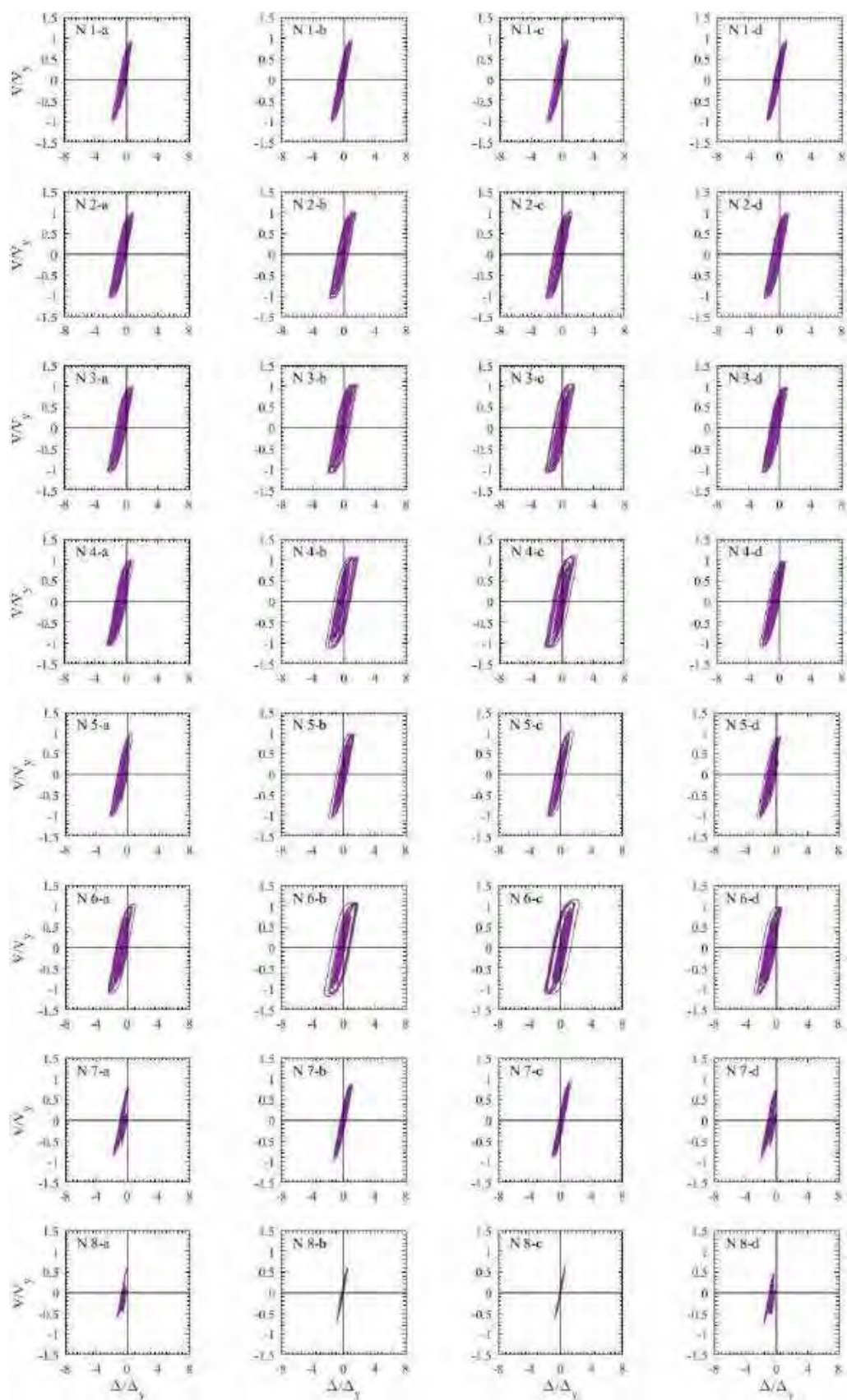


Figura F.159. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración GR27-A (2017)

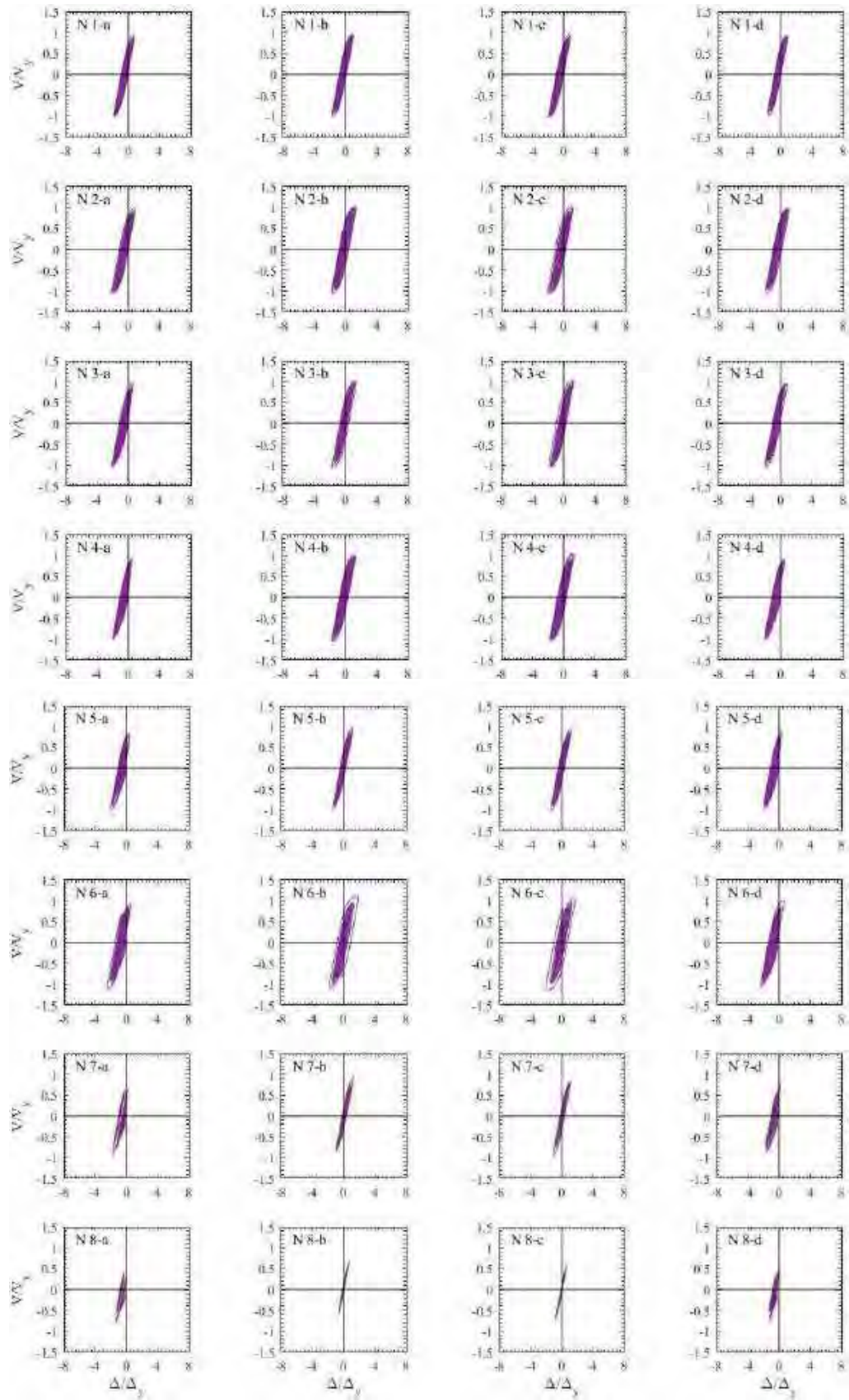


Figura F.160. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.2.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x

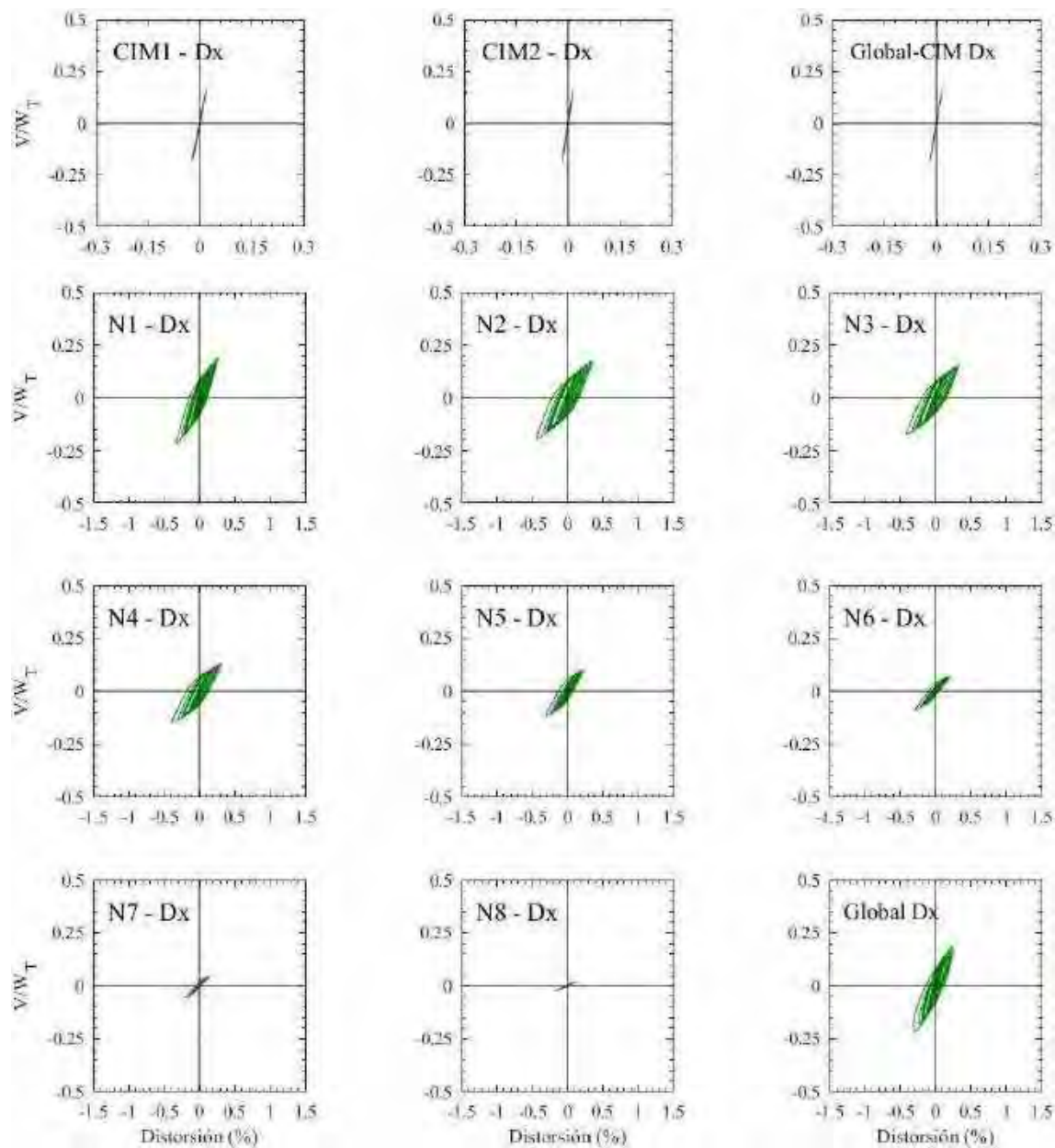


Figura F.161. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración AO24-A

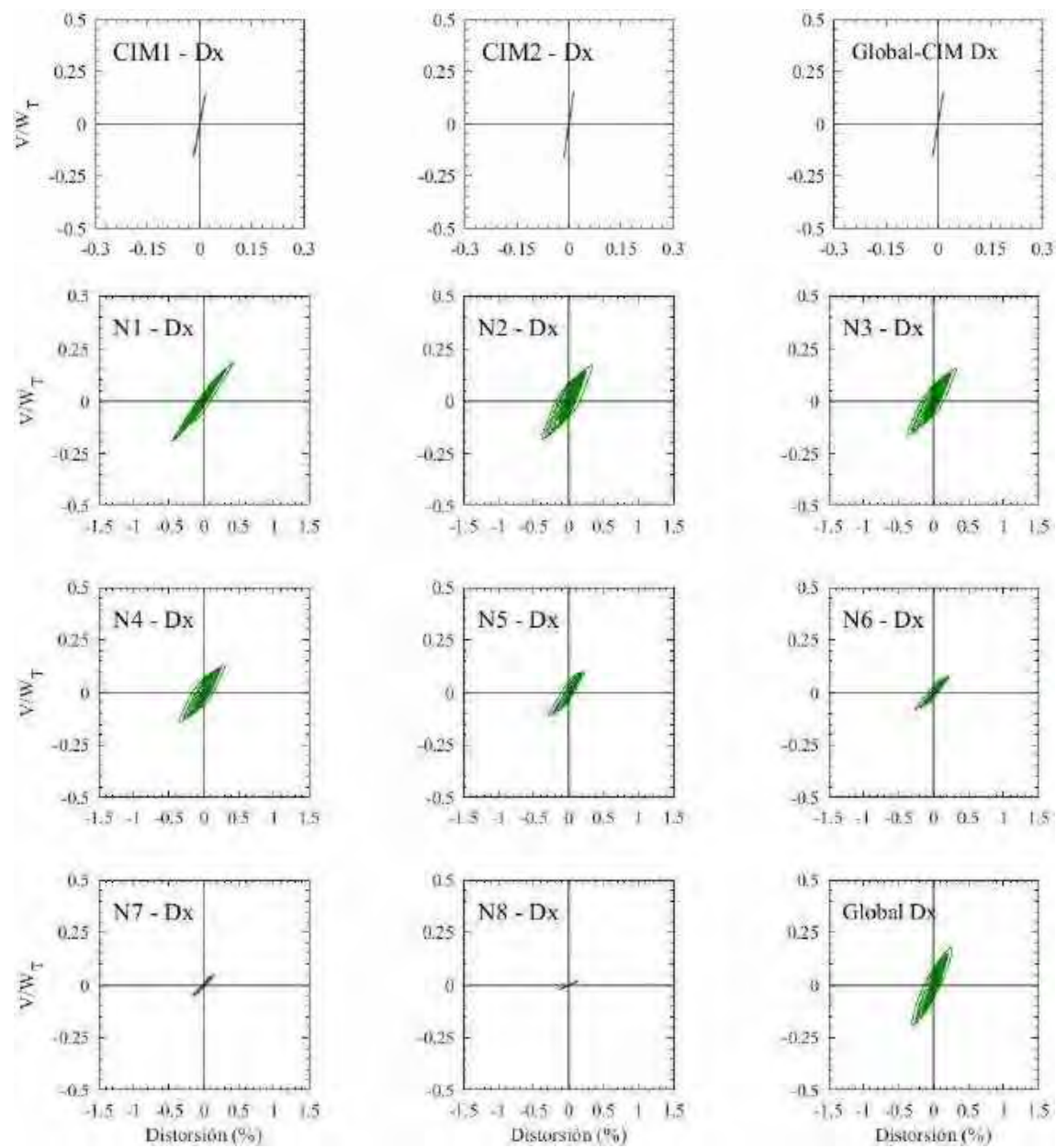


Figura F.162. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración AO24-B

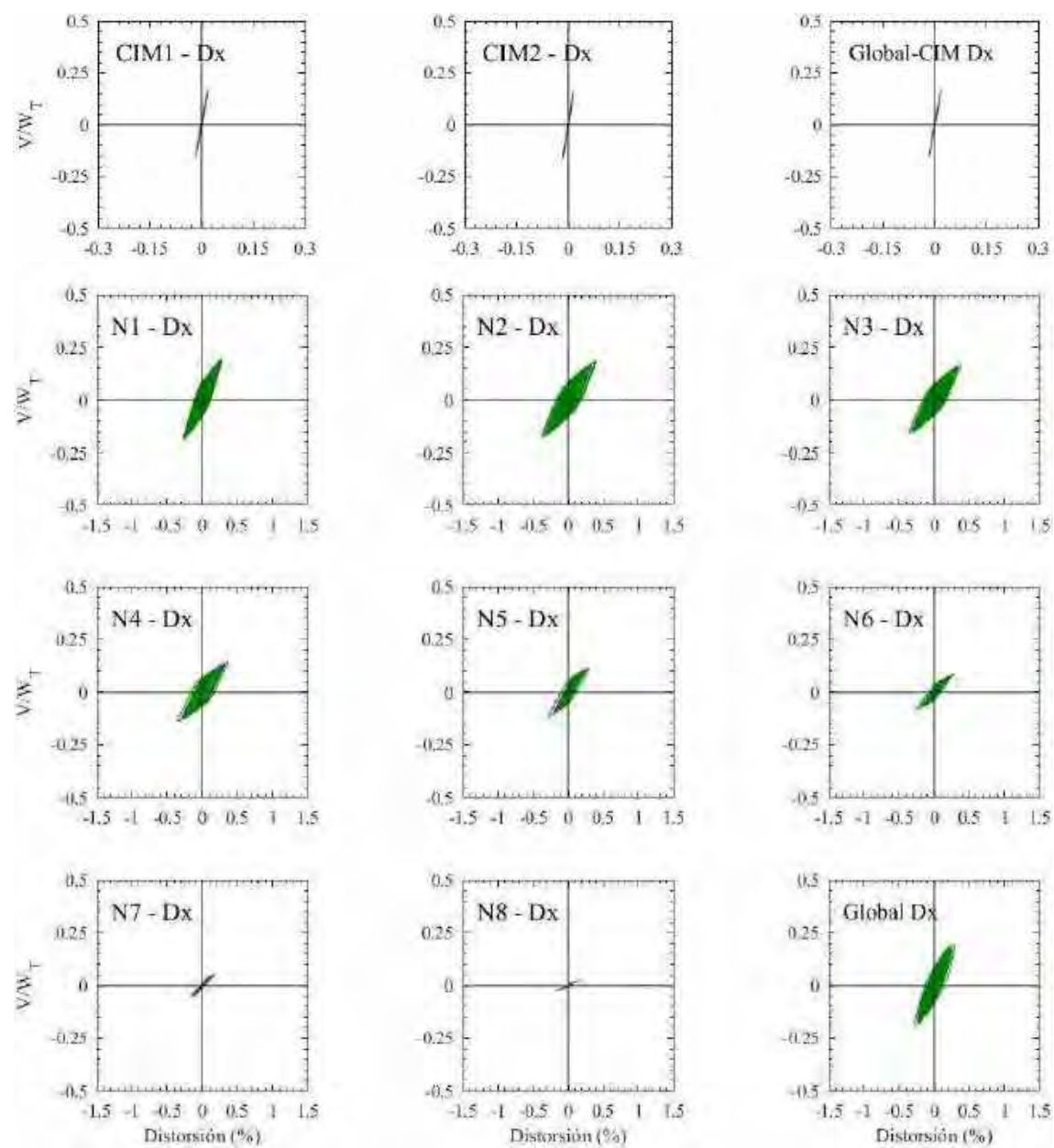


Figura F.163. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración CLRT-A

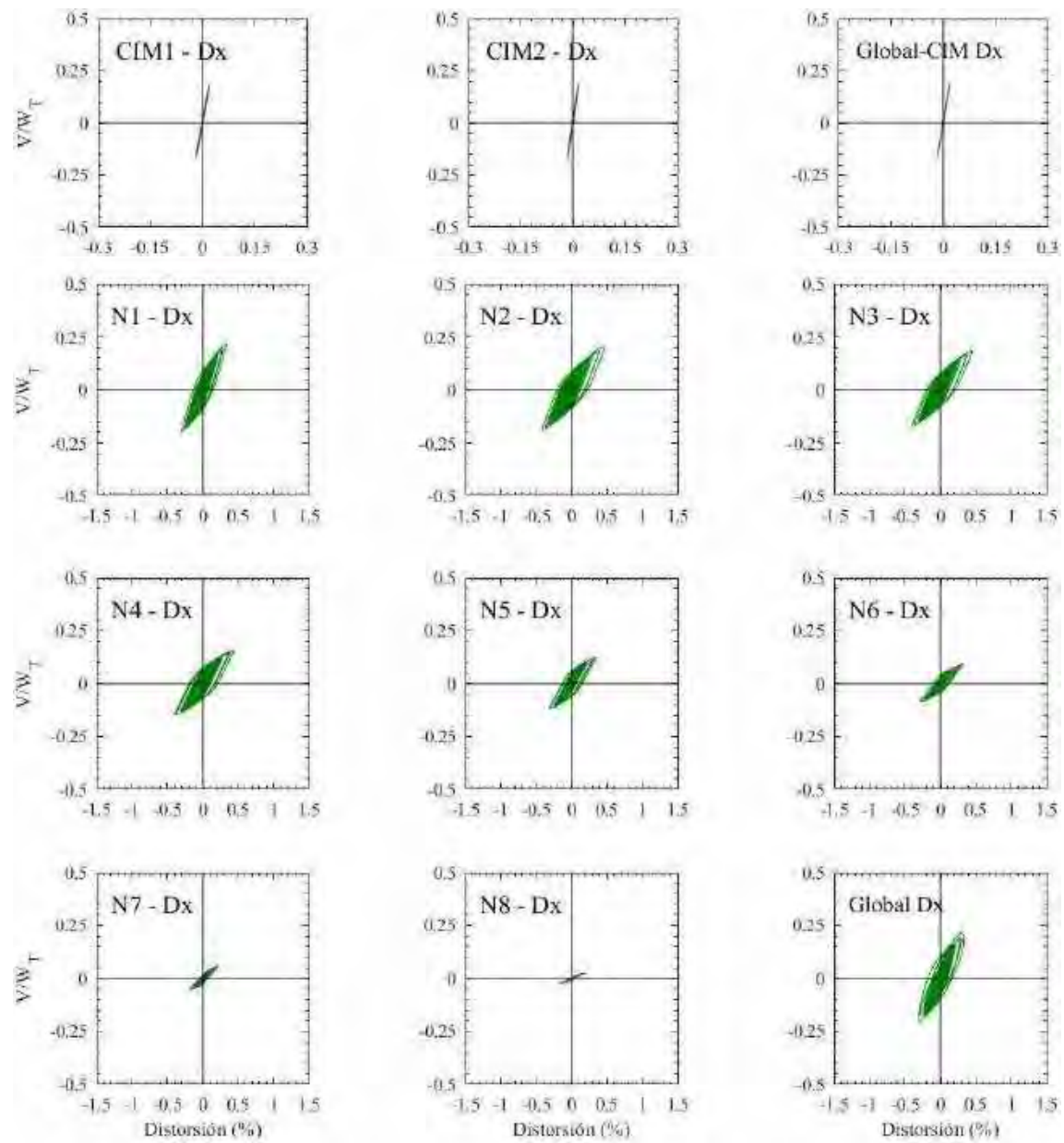


Figura F.164. Ciclos de histéresis de los entropisos en dirección x , registros de aceleración CLRT-B

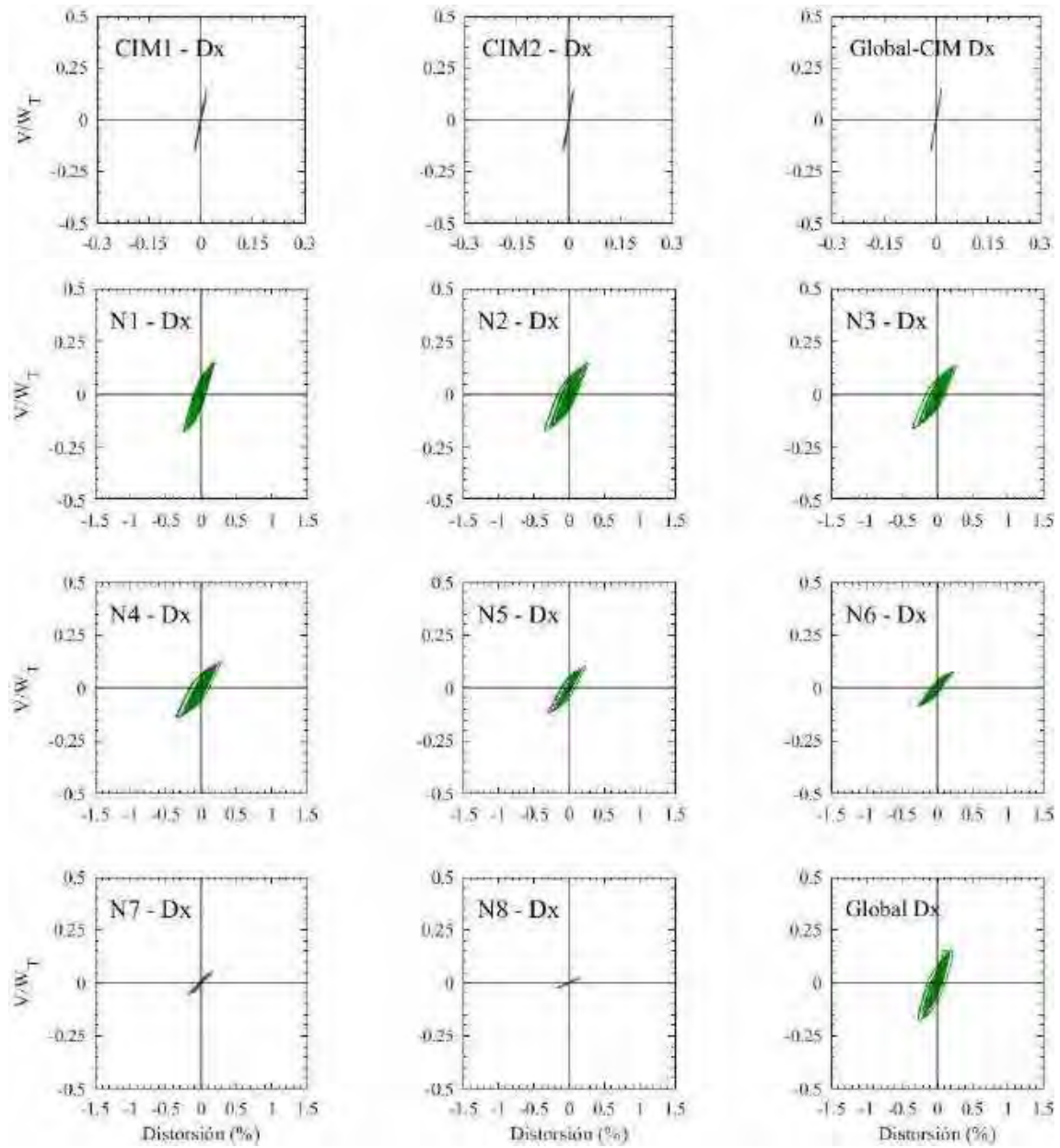


Figura F.165. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración COYS-A

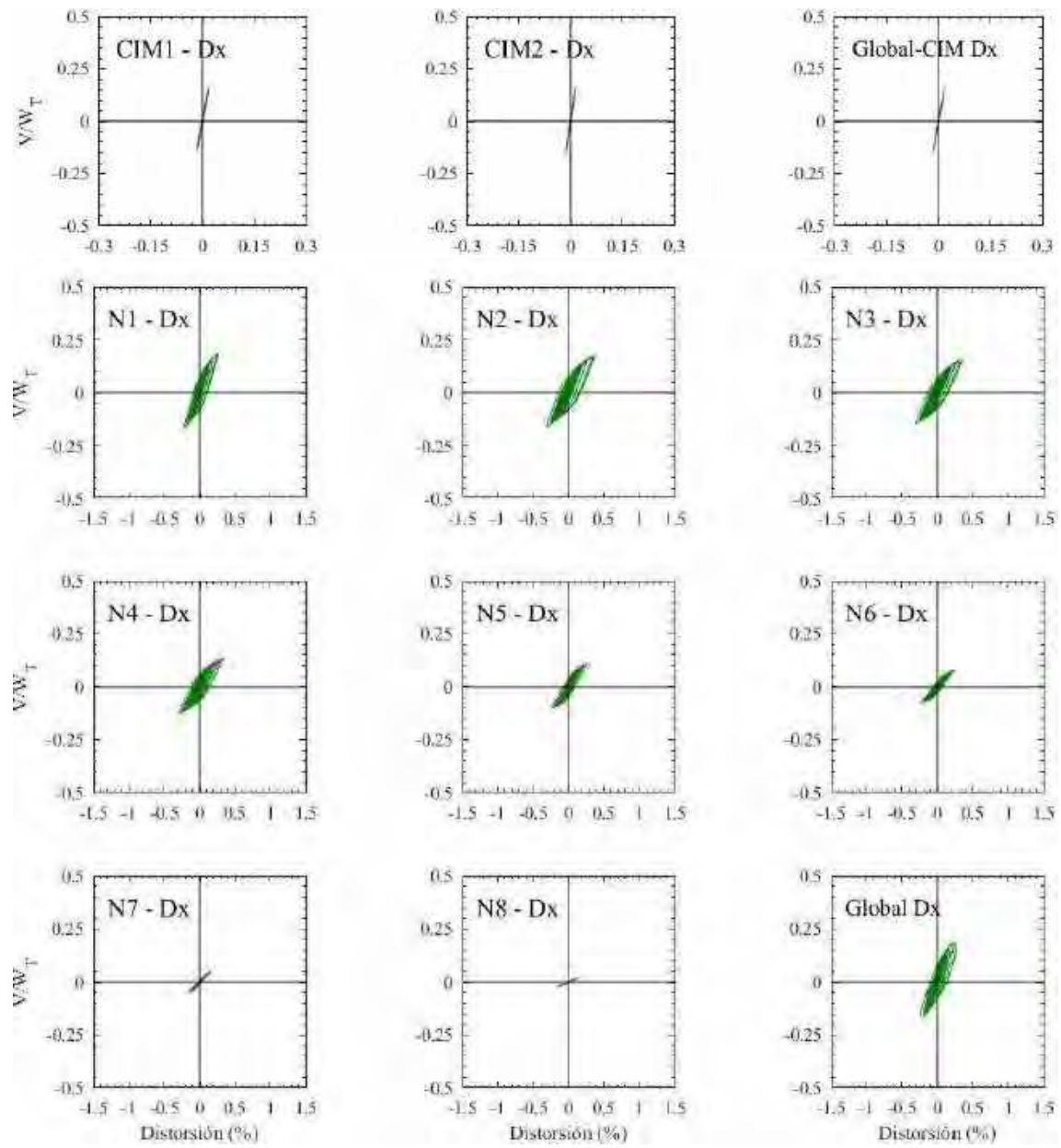


Figura F.166. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración COYS-B

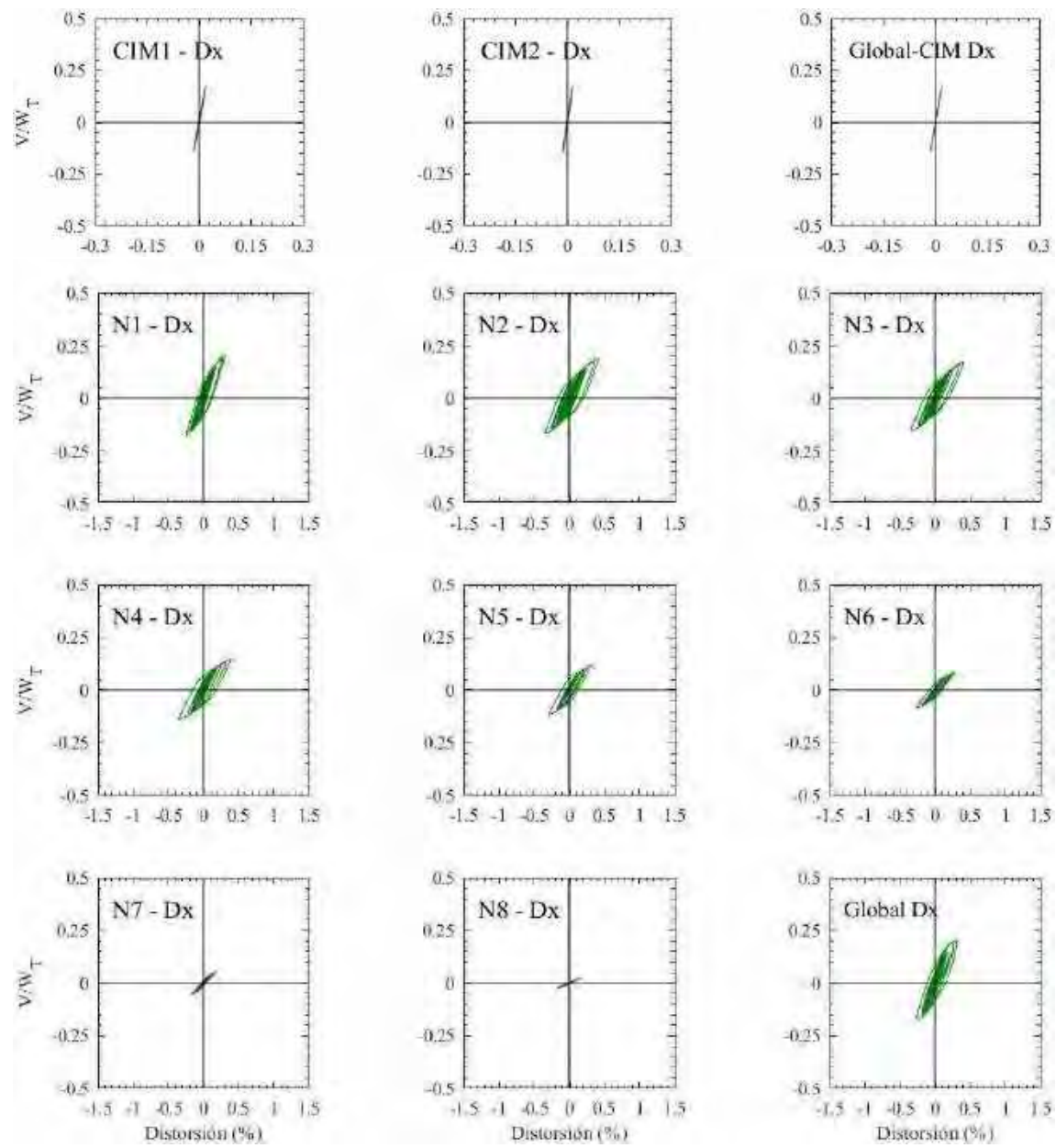


Figura F.167. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración DR16-A

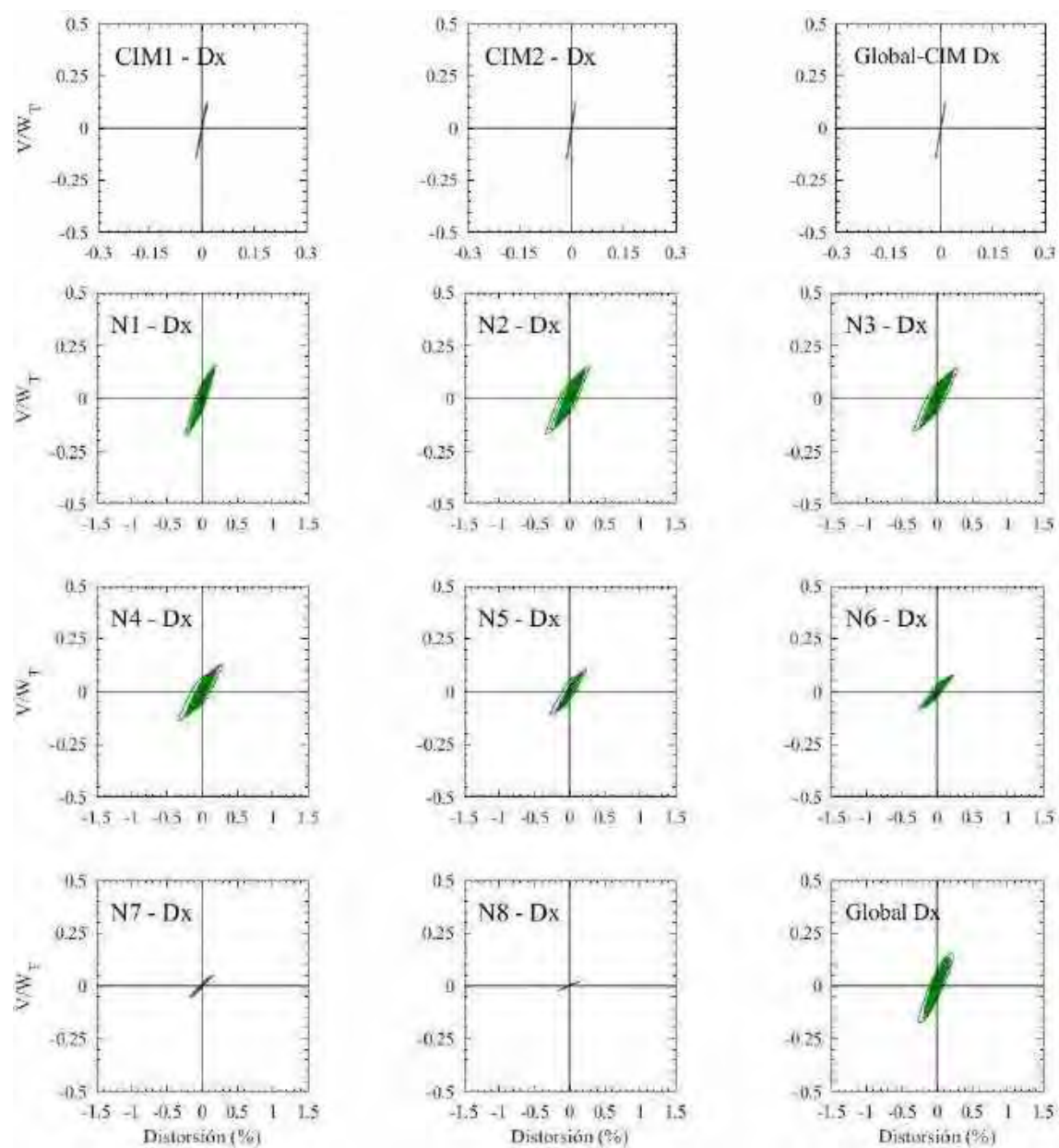


Figura F.168. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración DR16-B

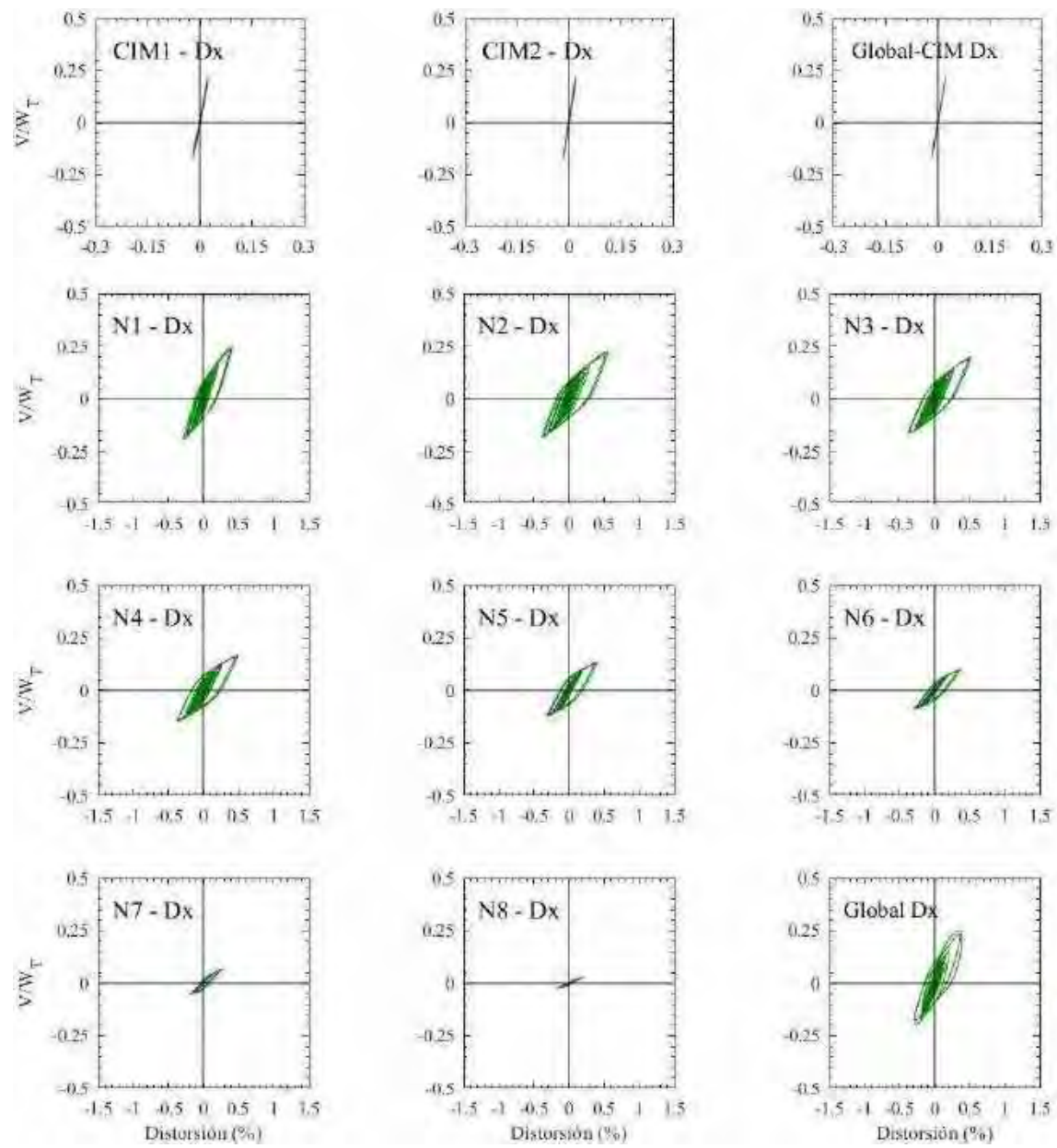


Figura F.169. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración EO30-A

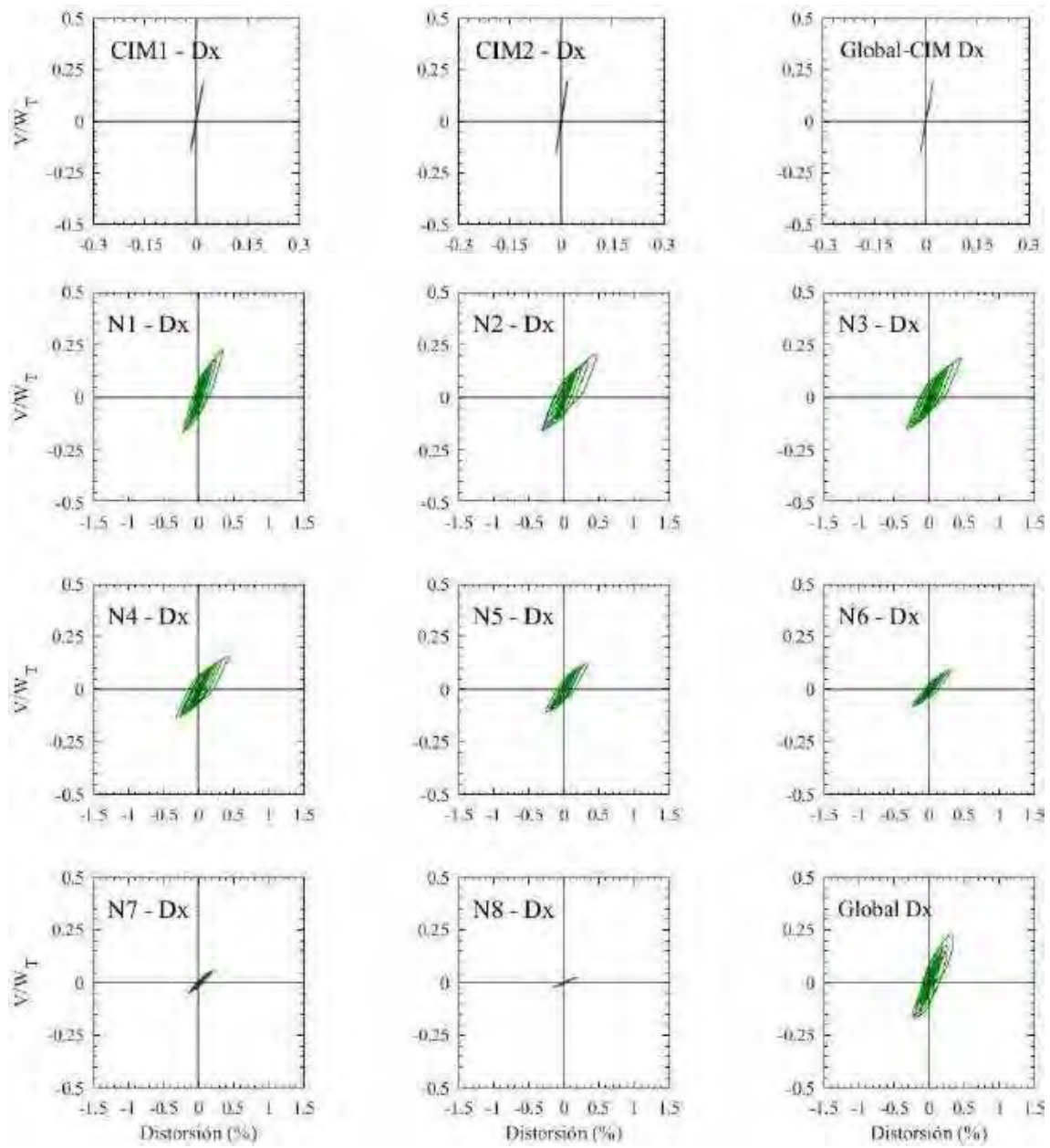


Figura F.170. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración EO30-B

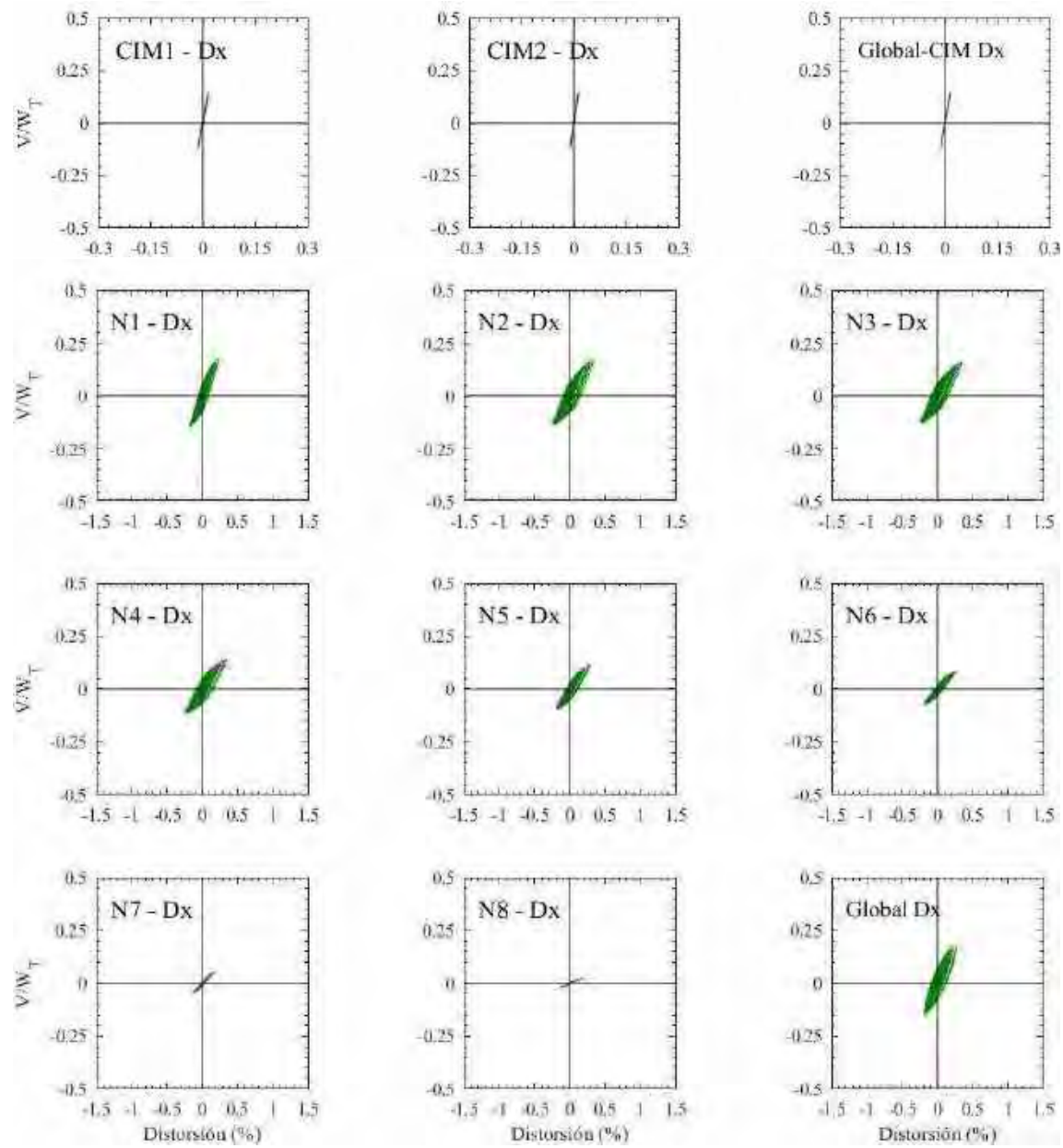


Figura F.171. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración GR27-A

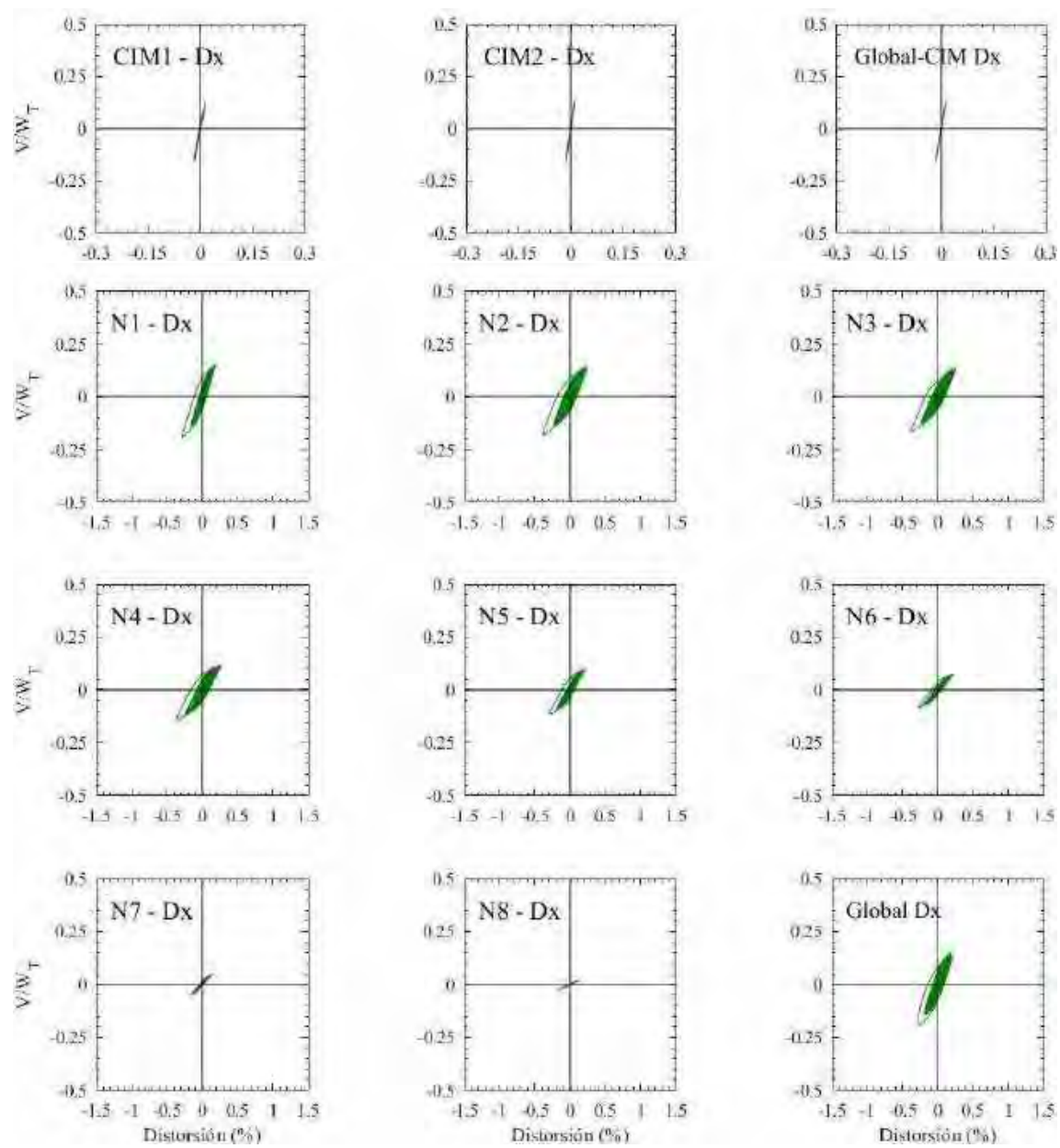


Figura F.172. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración GR27-B

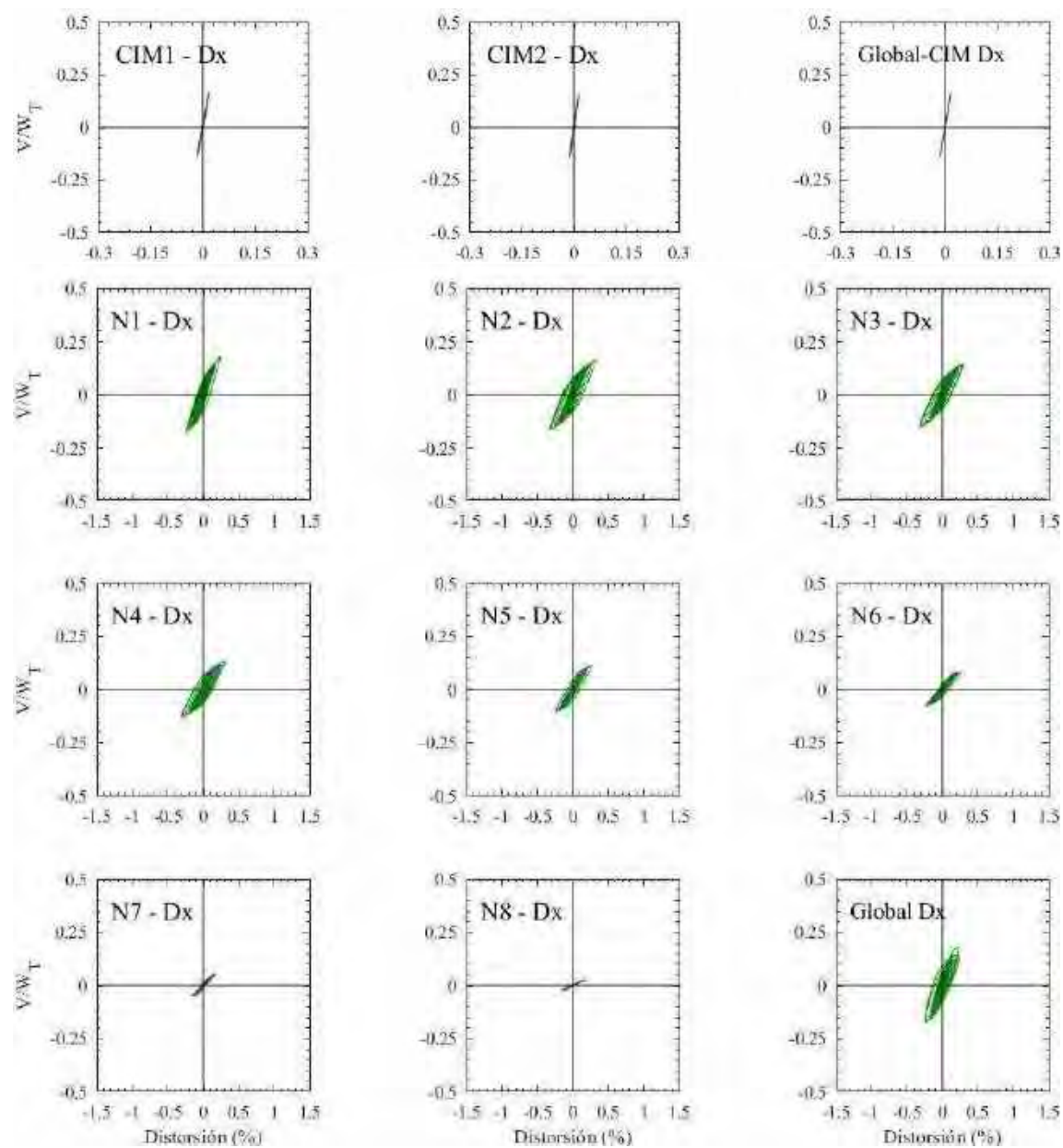


Figura F.173. Ciclos de histéresis de los entropisos en dirección x , registros de aceleración SXVI-A (1985)

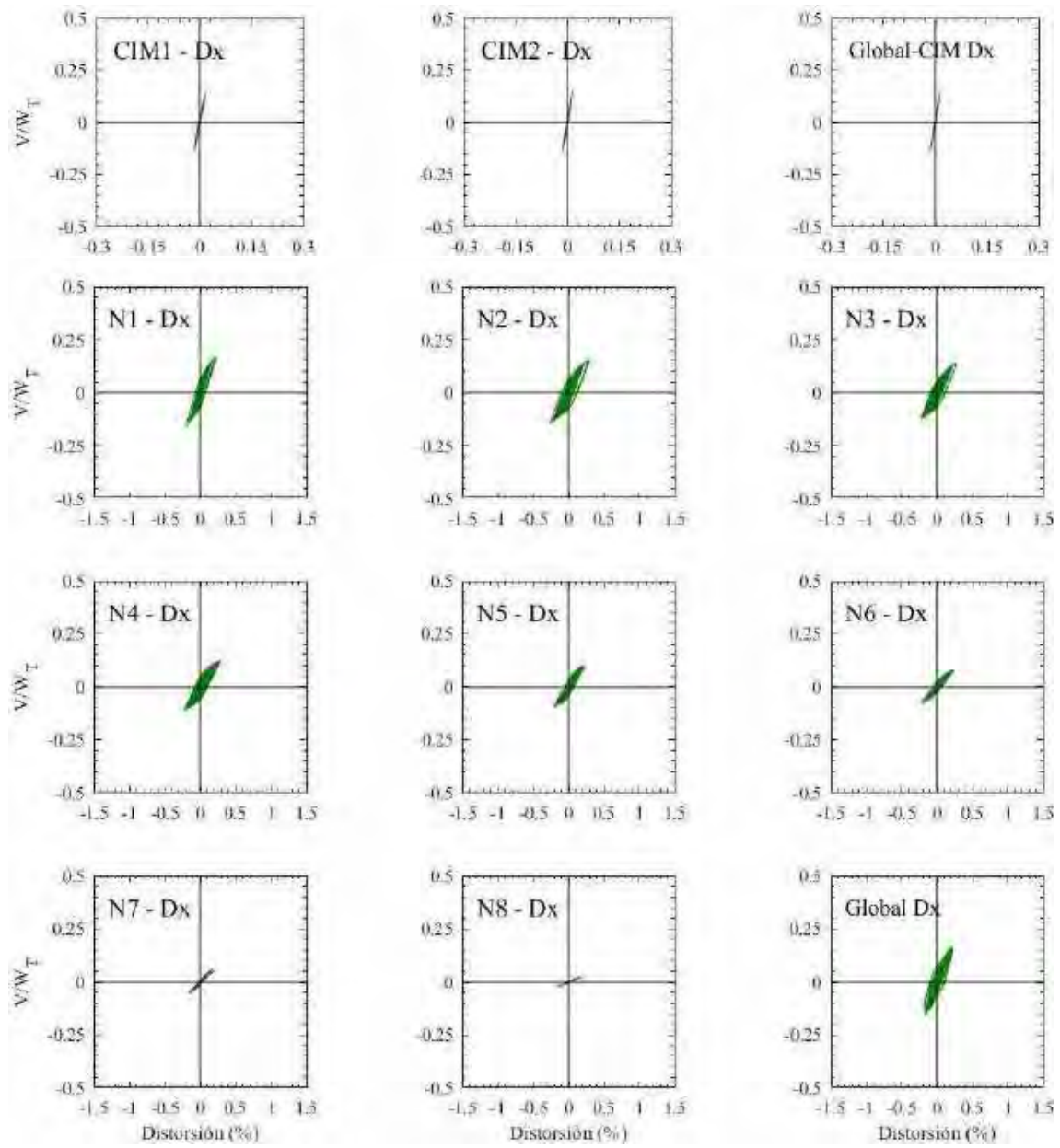


Figura F.174. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración SXVI - B (1985)

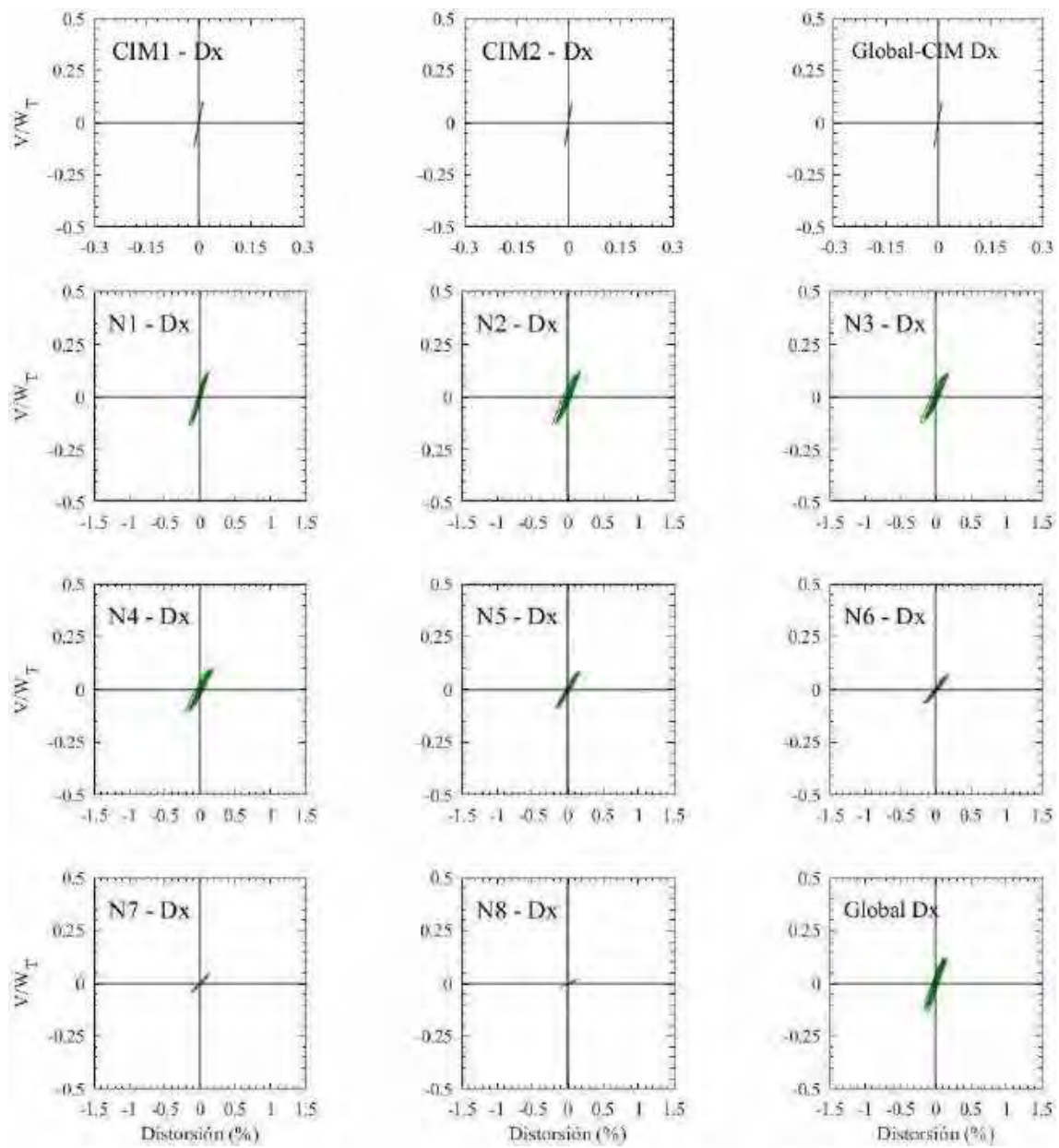


Figura F.175. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración GR27-A (2017)

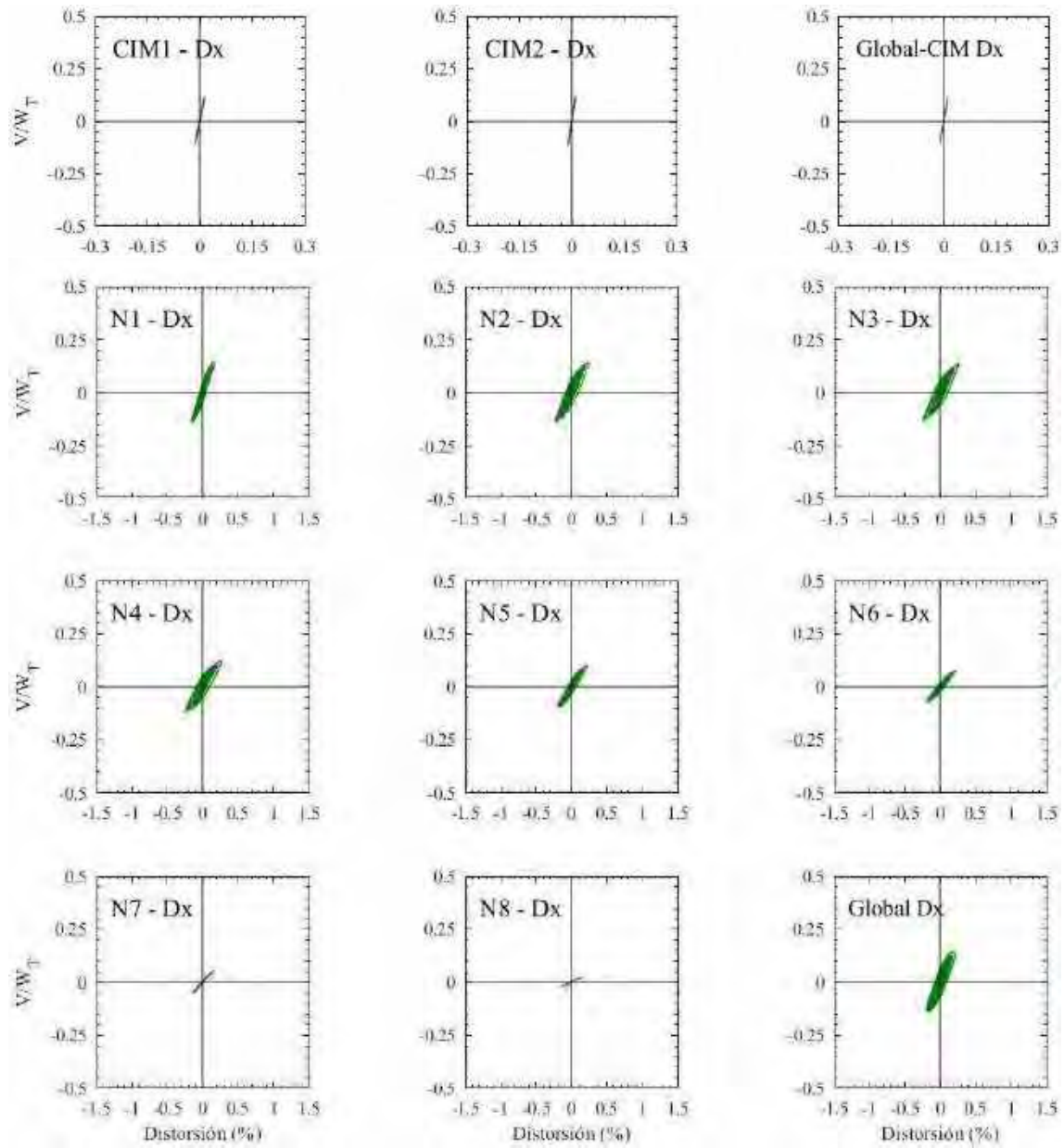


Figura F.176. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración GR27-B (2017)

F.2.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y

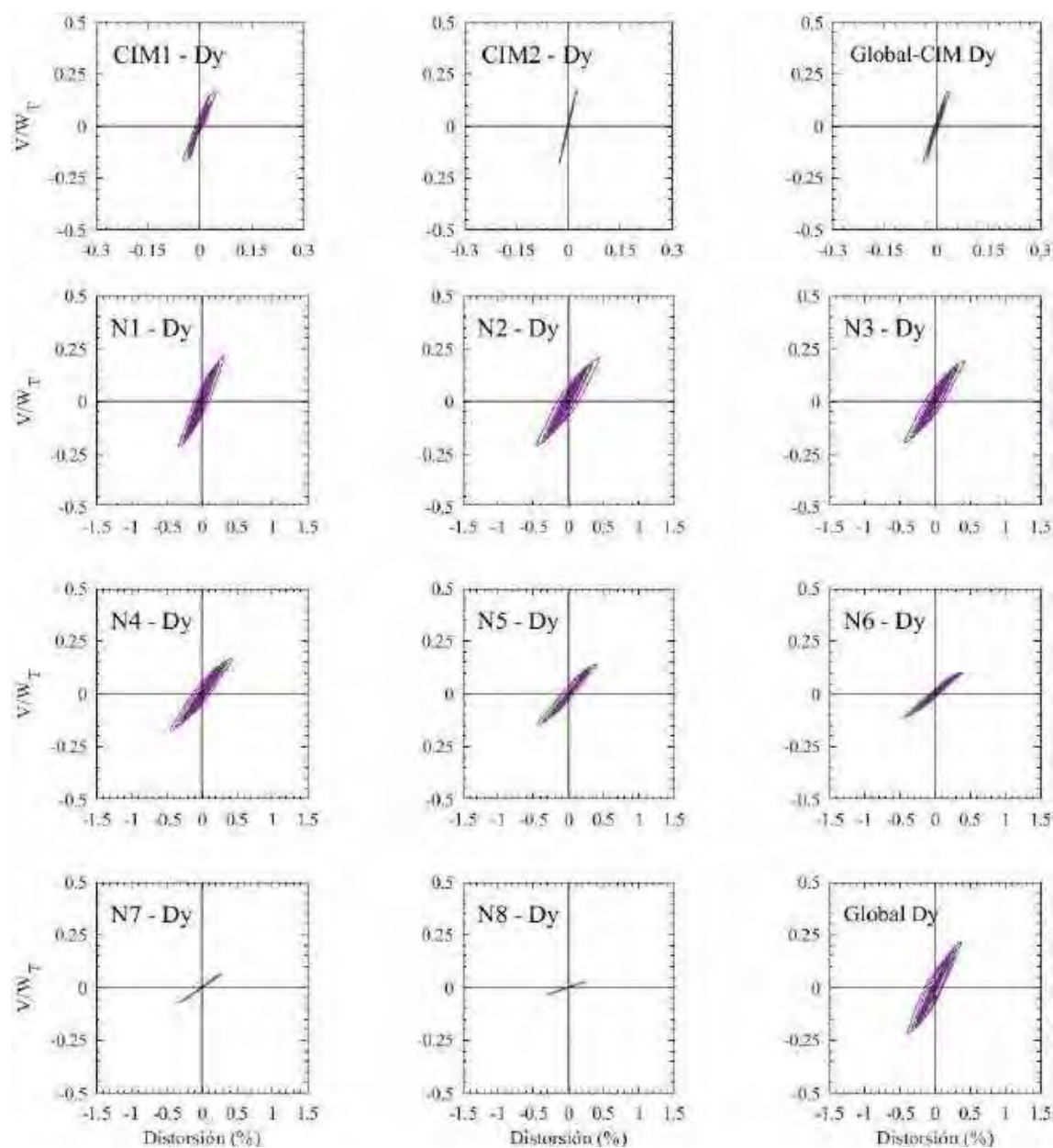


Figura F.177. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración AO24-A

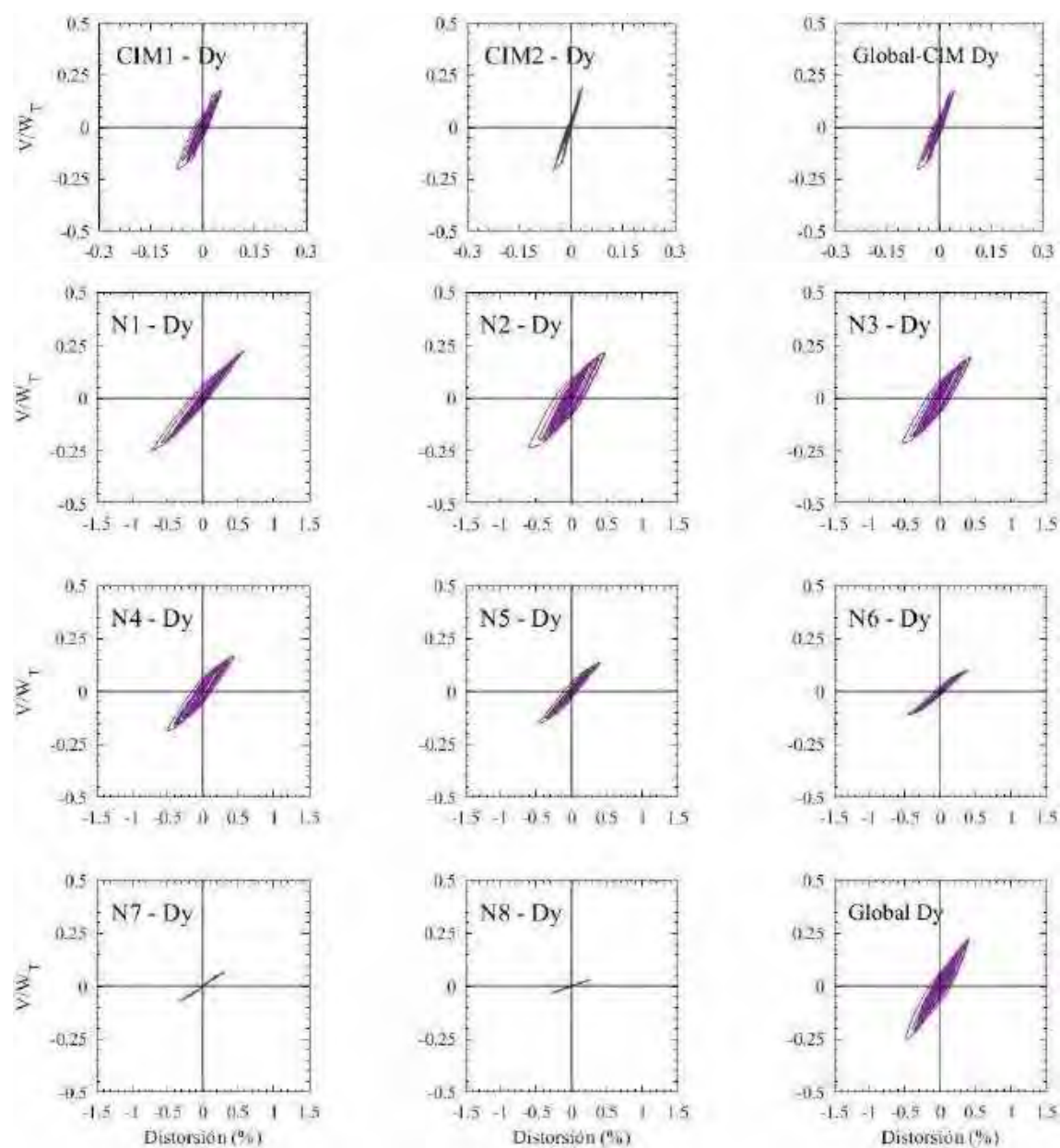


Figura F.178. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración AO24-B

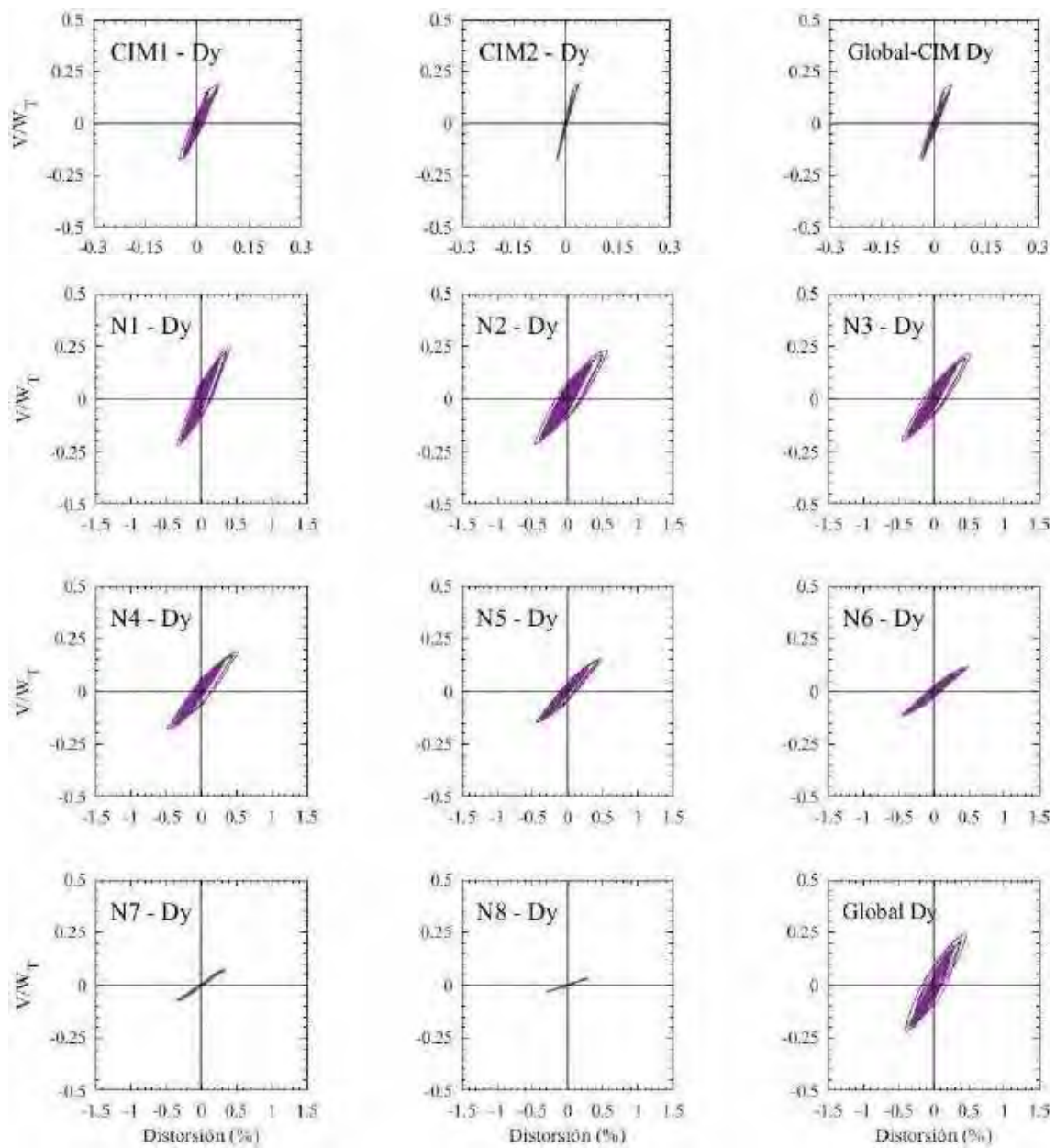


Figura F.179. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CLRT-A

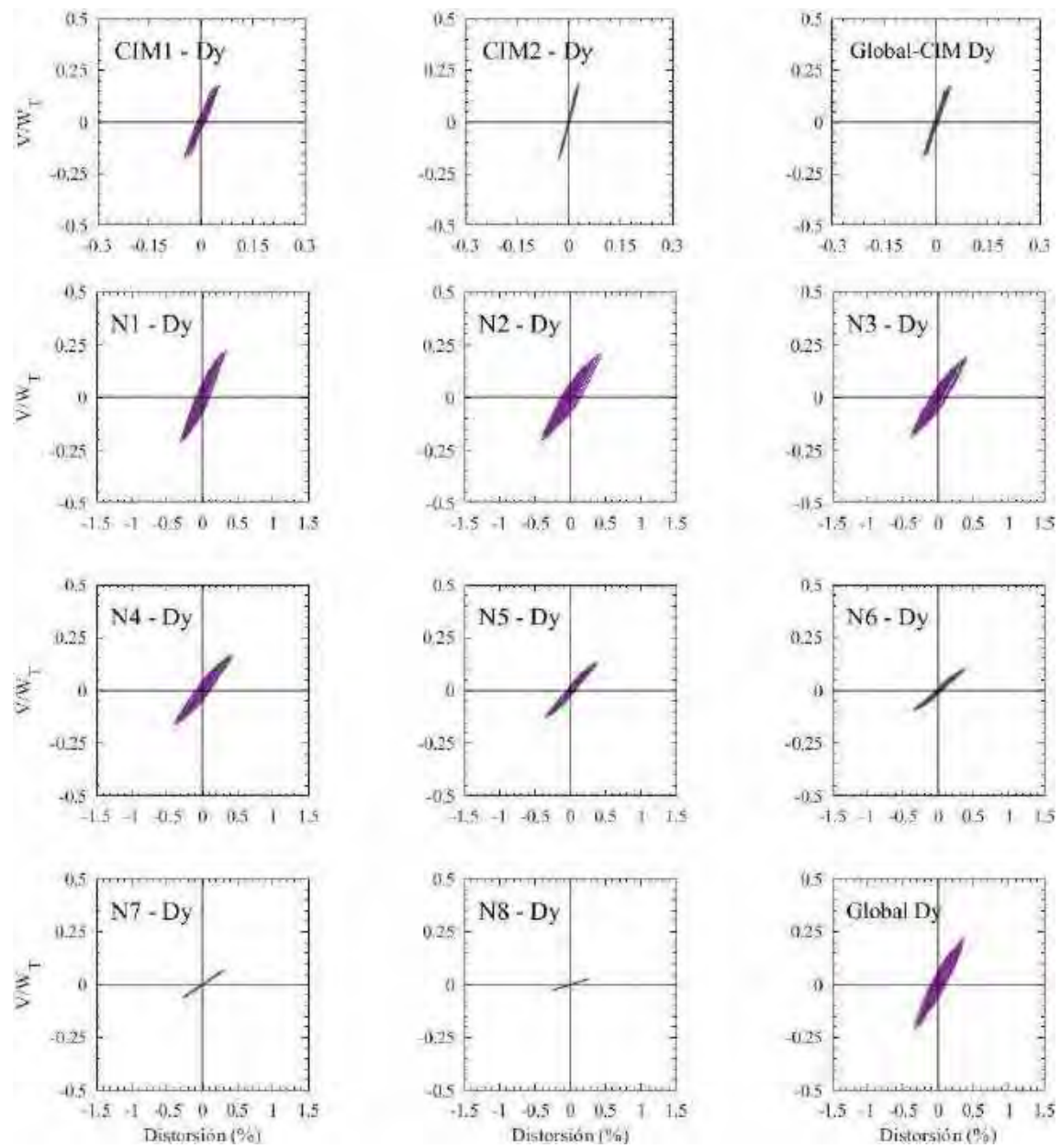


Figura F.180. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CLRT-B

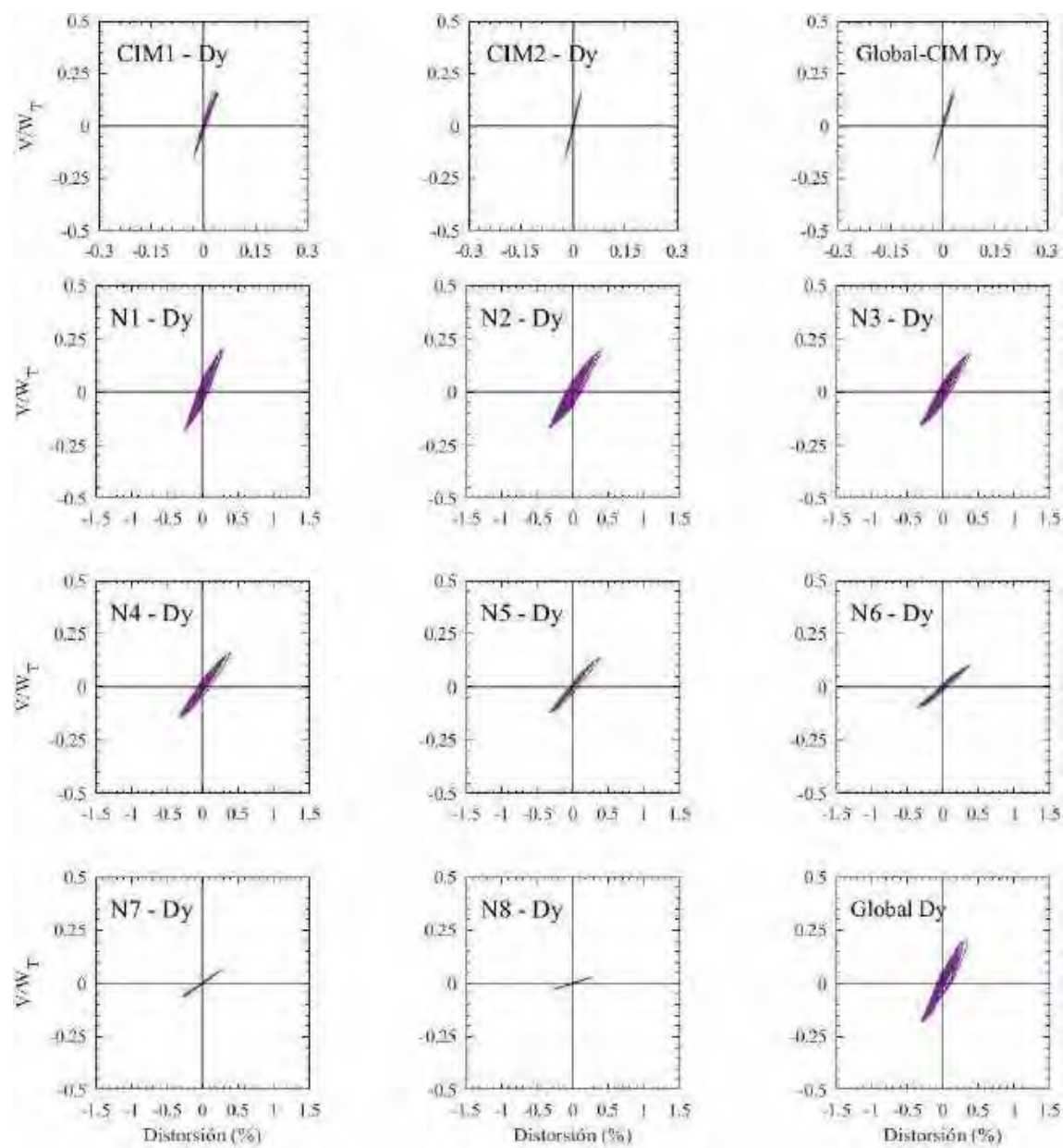


Figura F.181. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración COYS-A

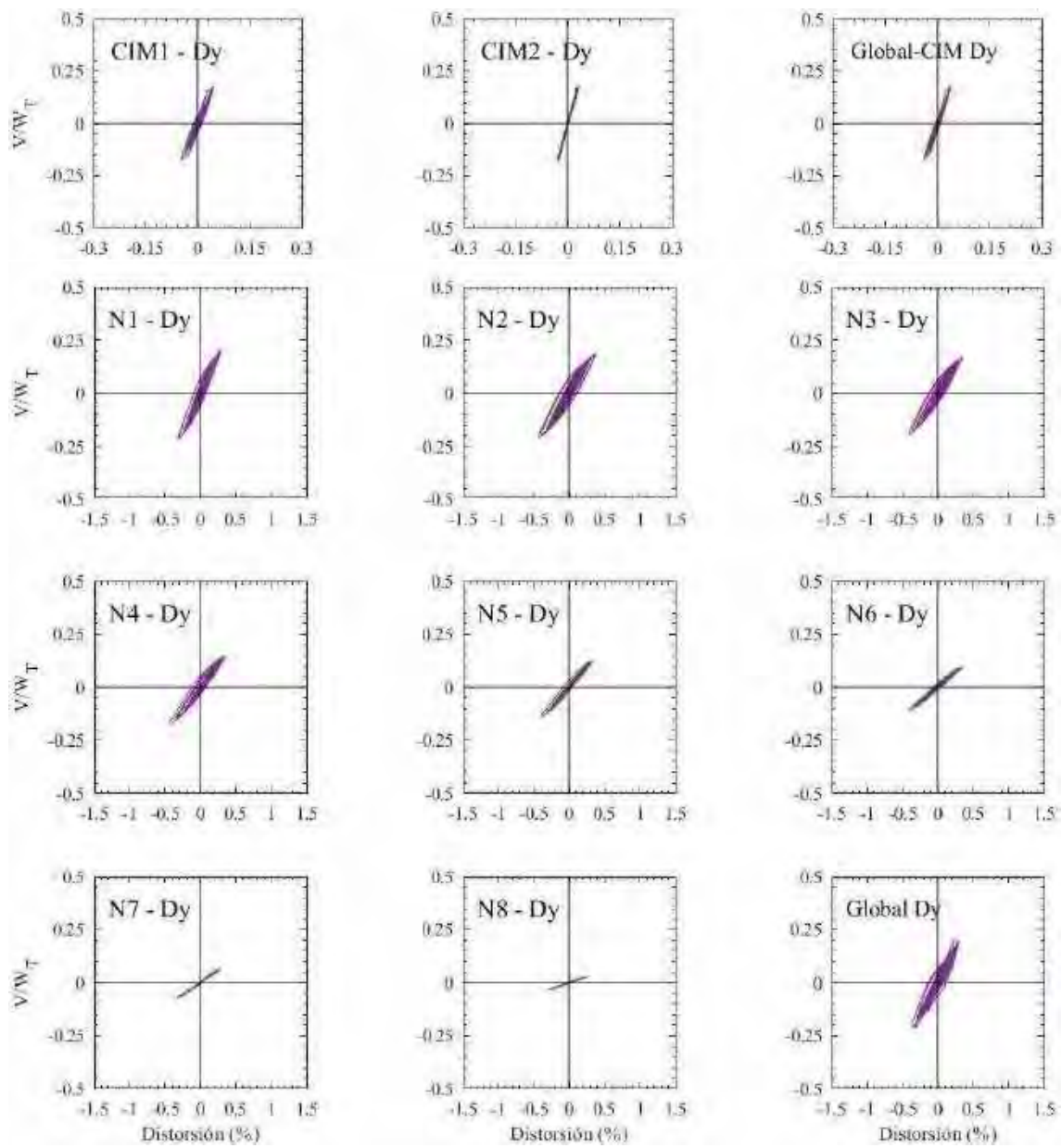


Figura F.182. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración COYS-B

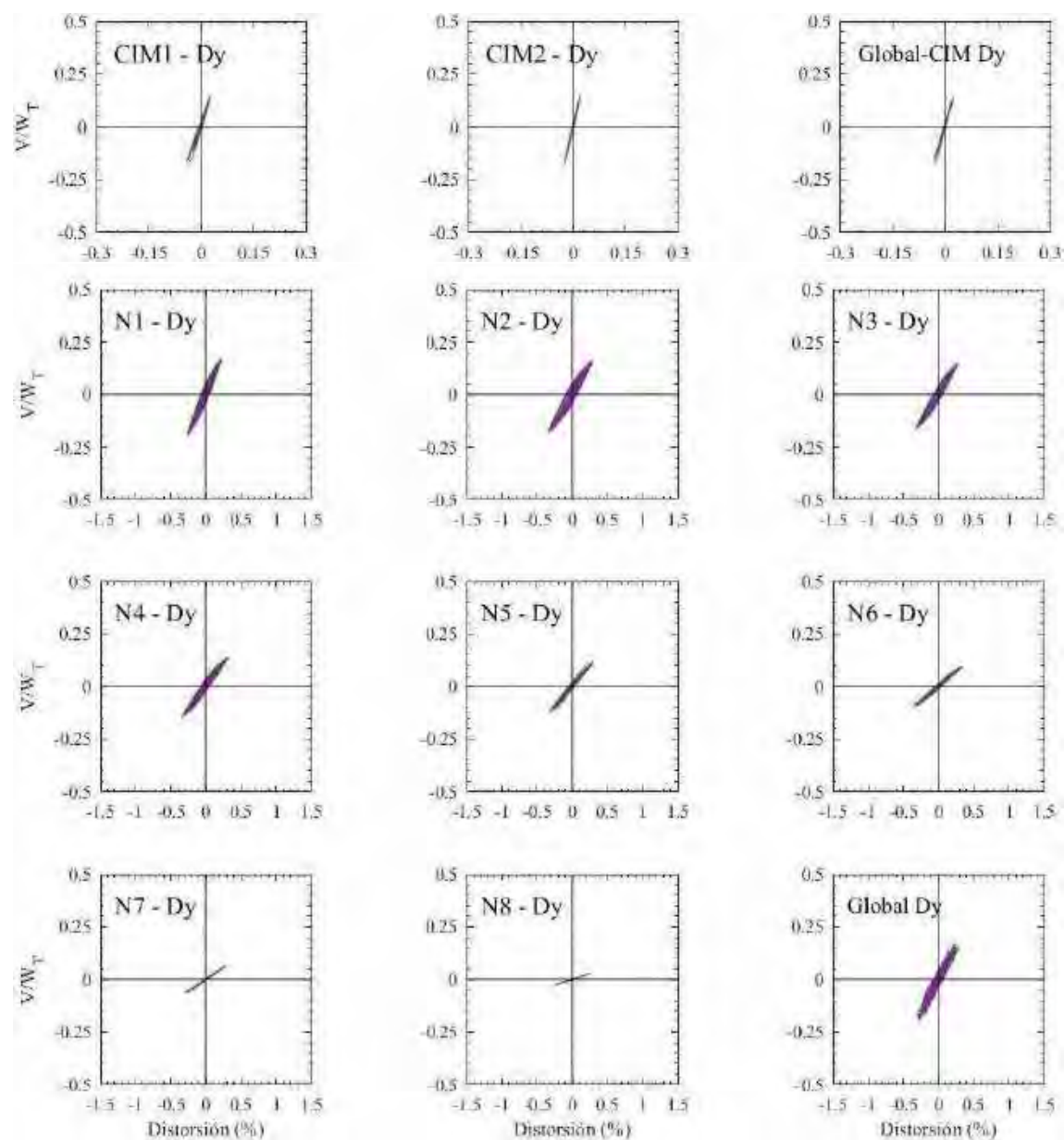


Figura F.183. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración DR16-A

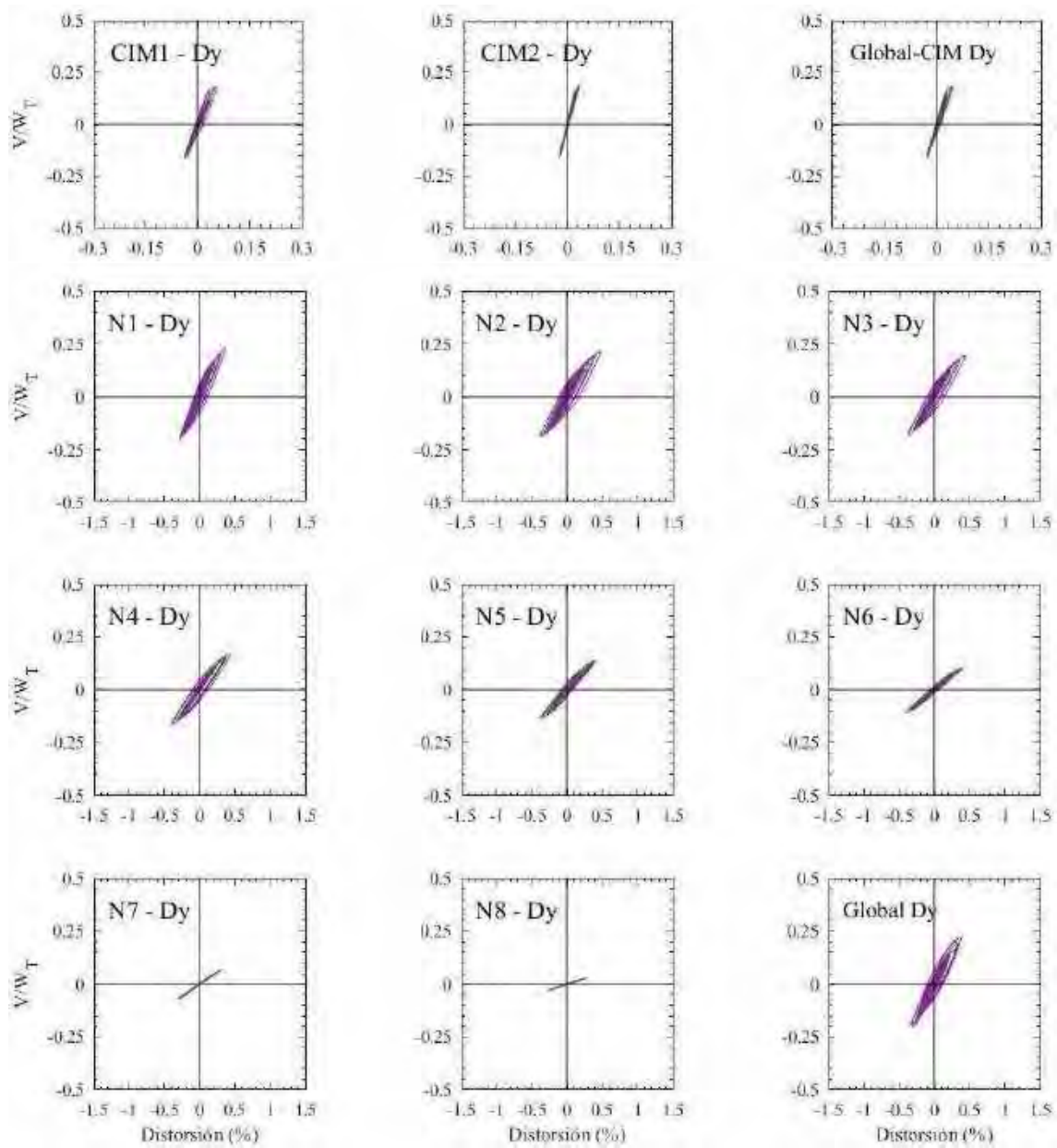


Figura F.184. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración DR16-B

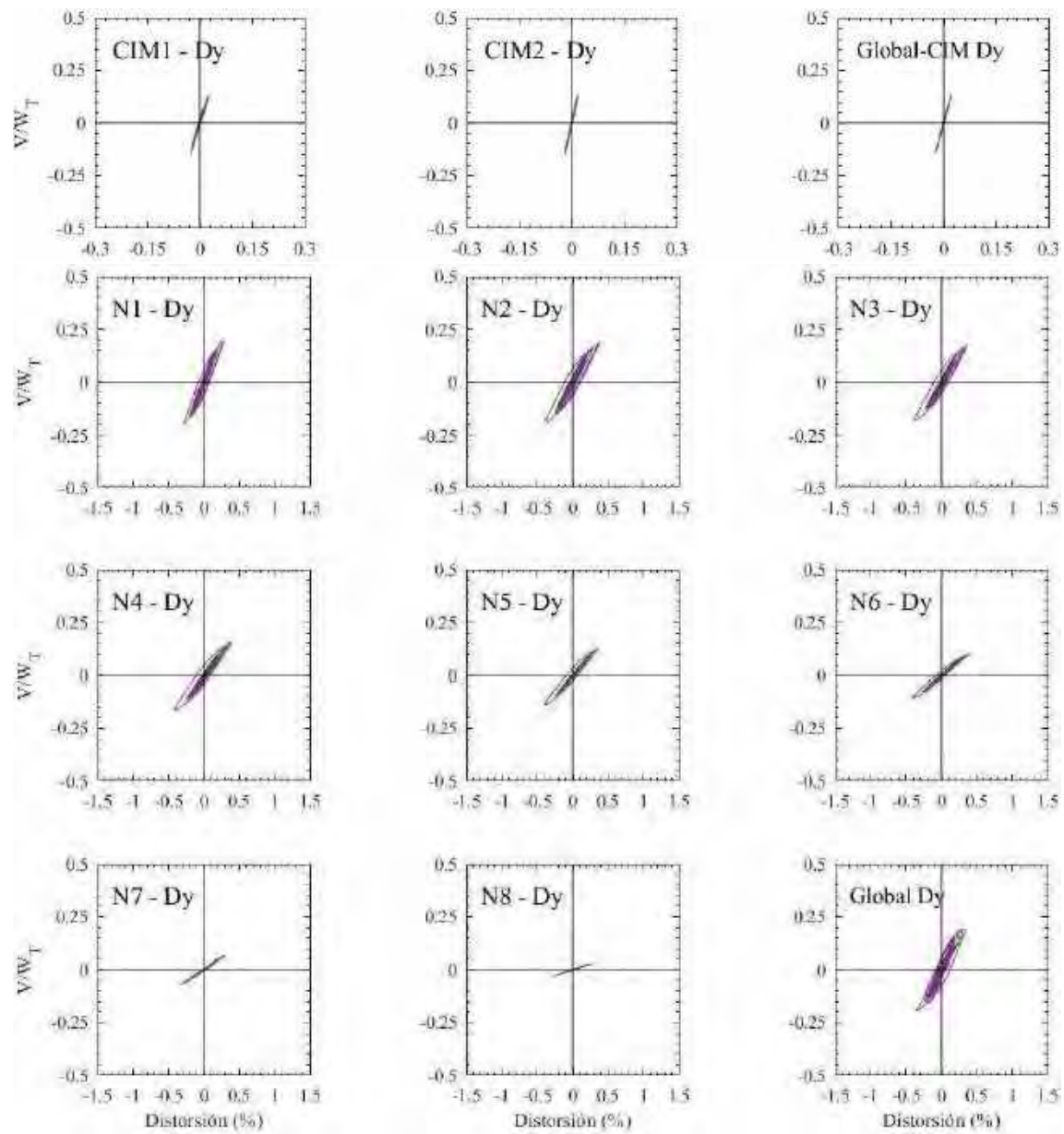


Figura F.185. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración EO30-A

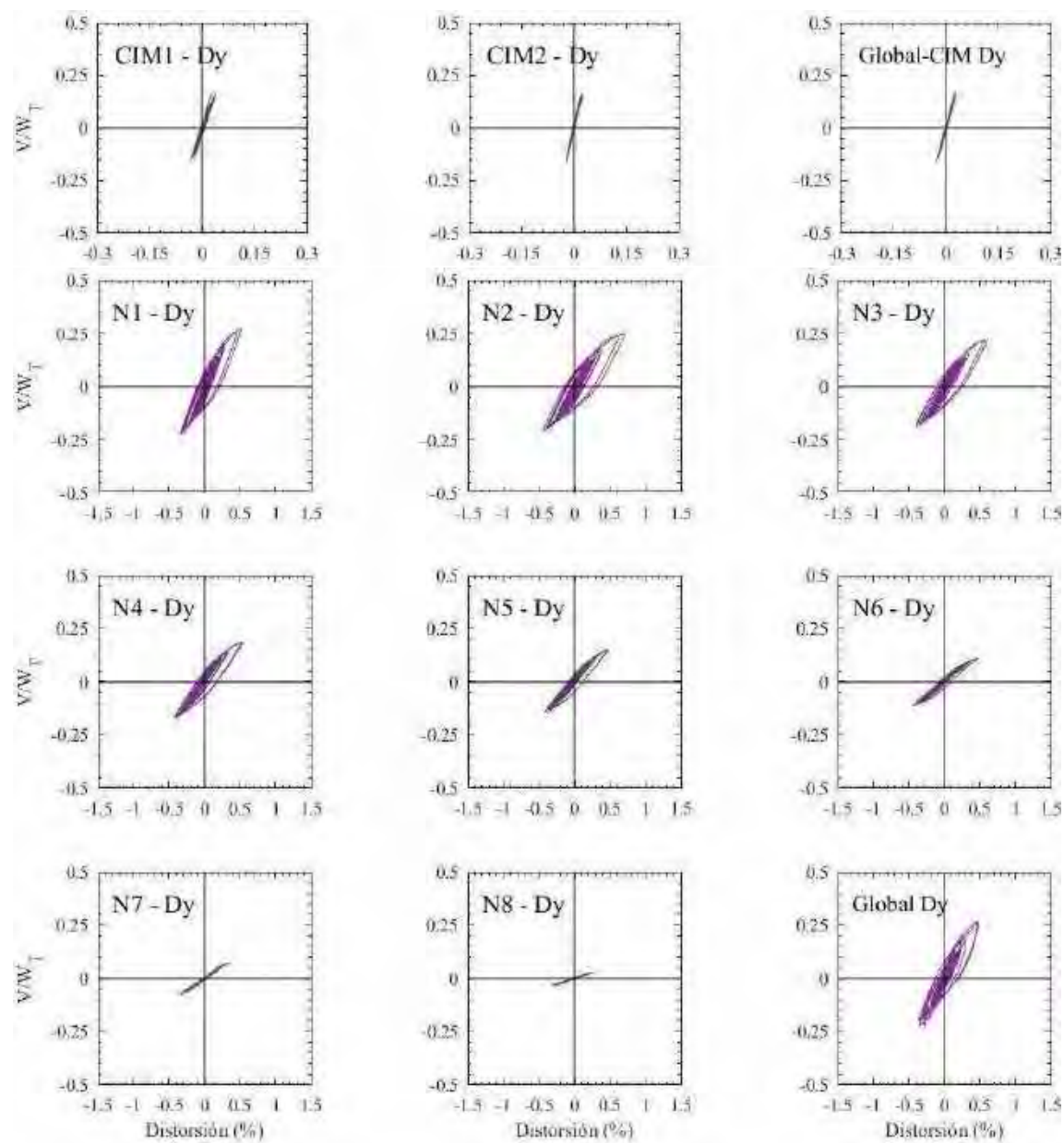


Figura F.186. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración EO30-B

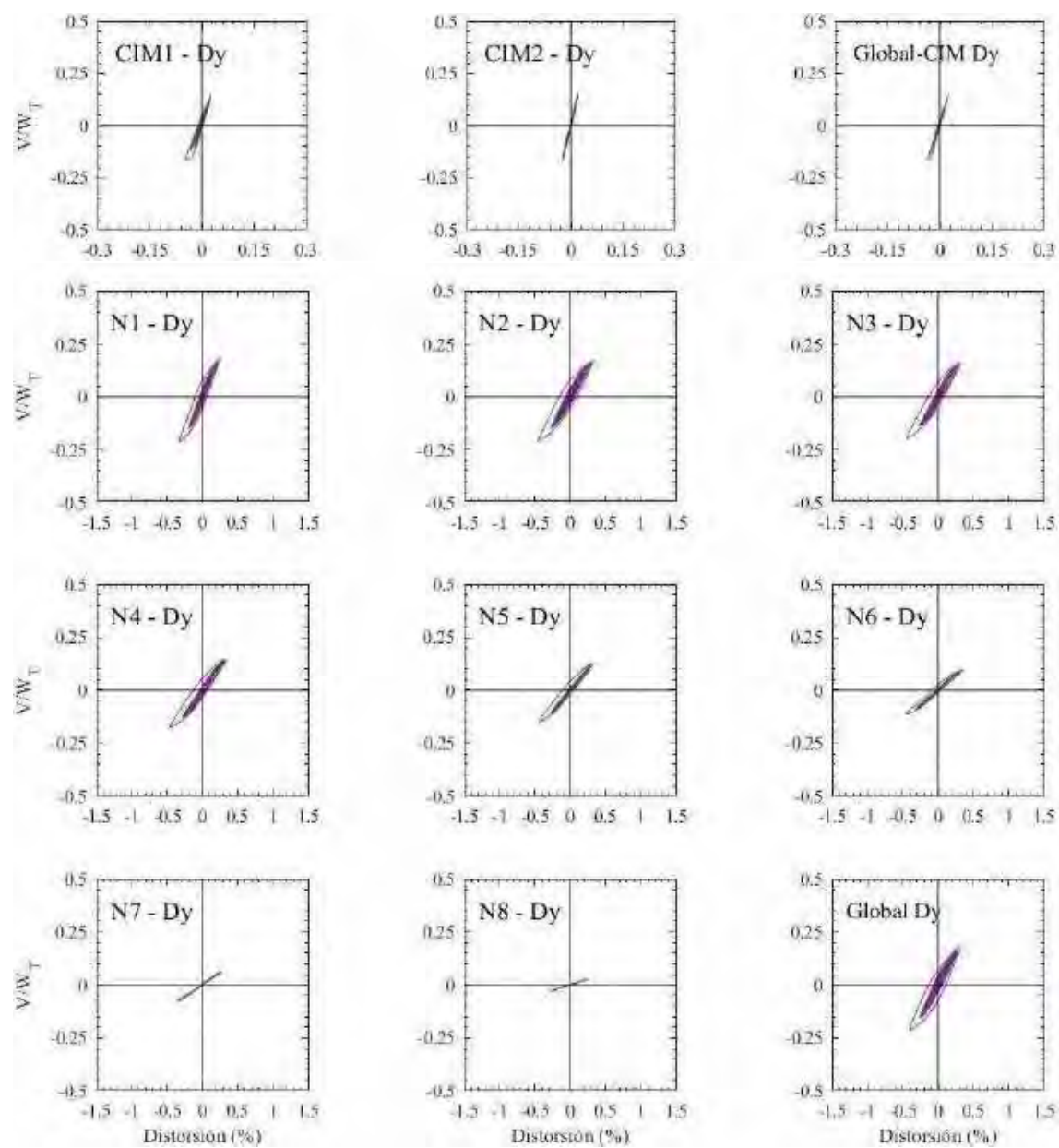


Figura F.187. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración GR27-A

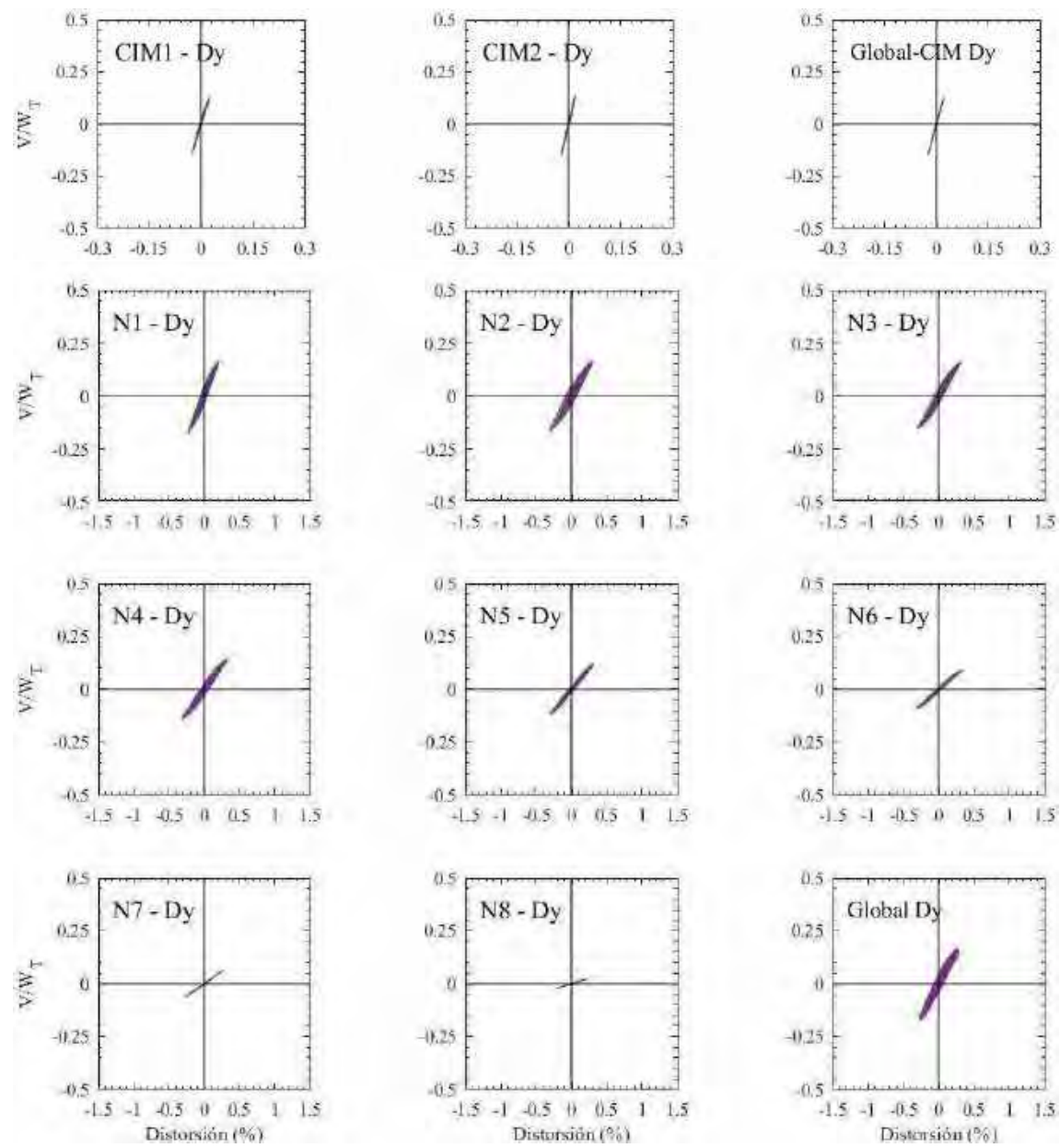


Figura F.188. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración GR27-B

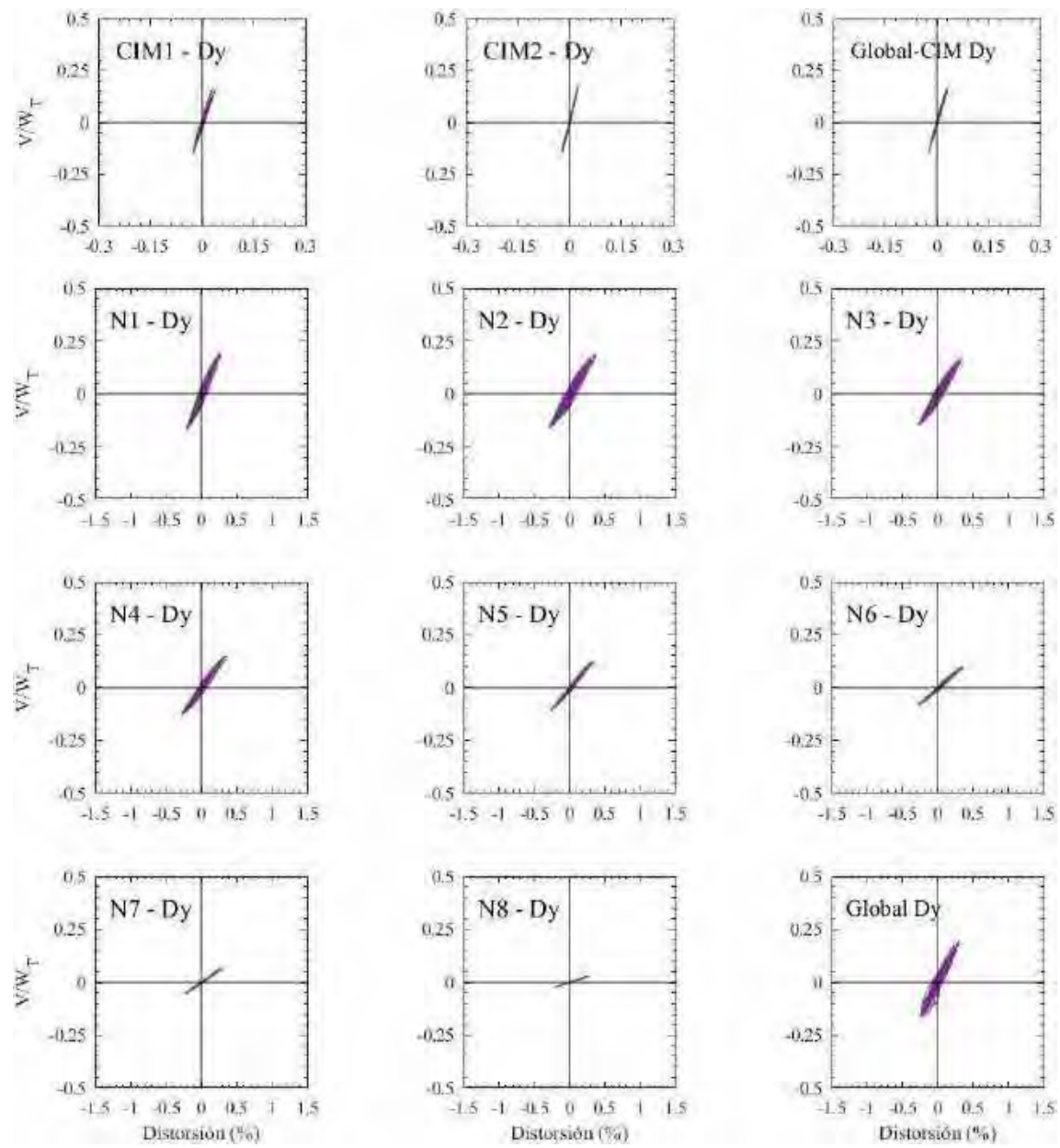


Figura F.189. Ciclos de histéresis de los entropisos en dirección y, registros de aceleración SXVI-A (1985)

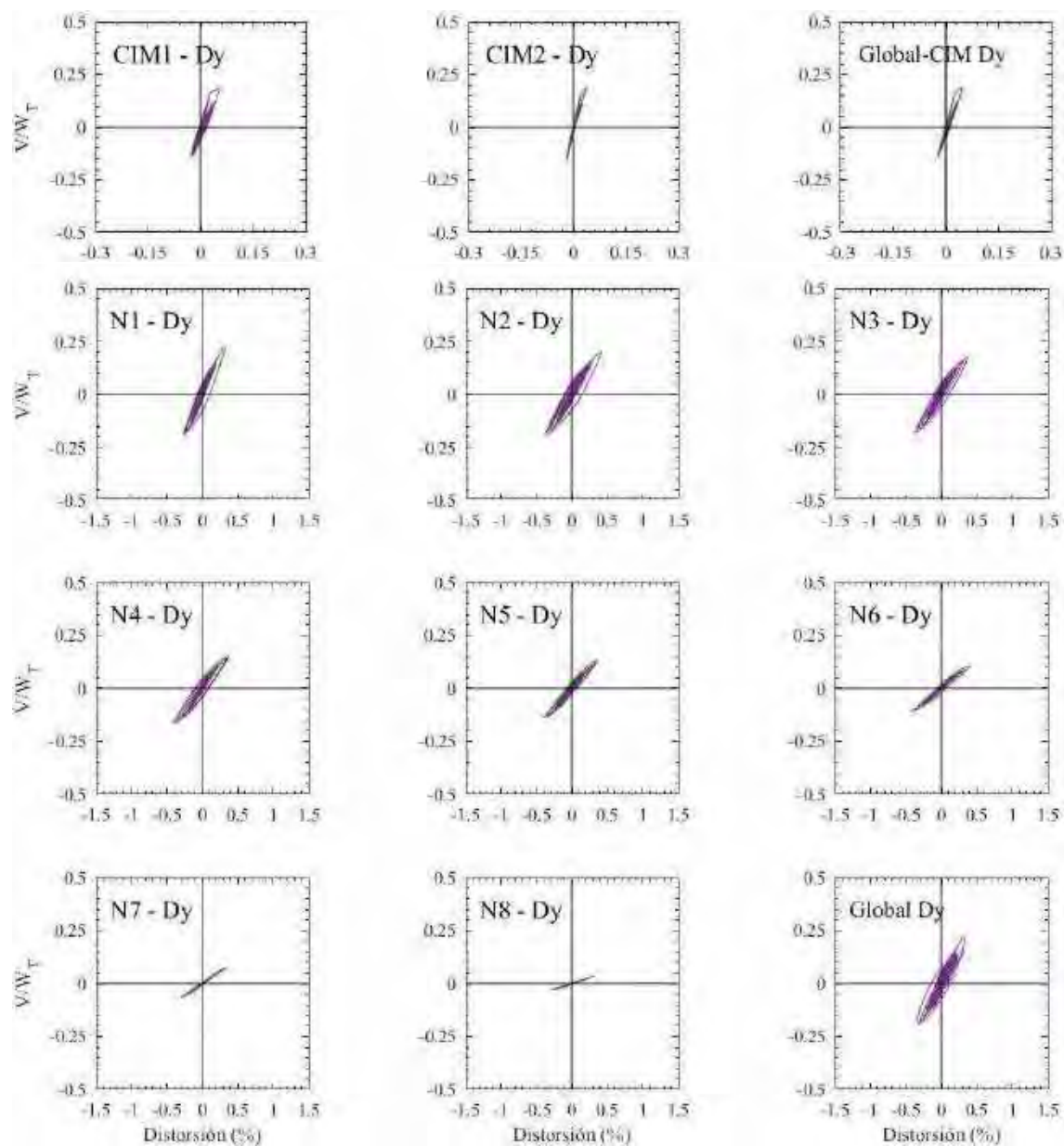


Figura F.190. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración SXVI-B (1985)

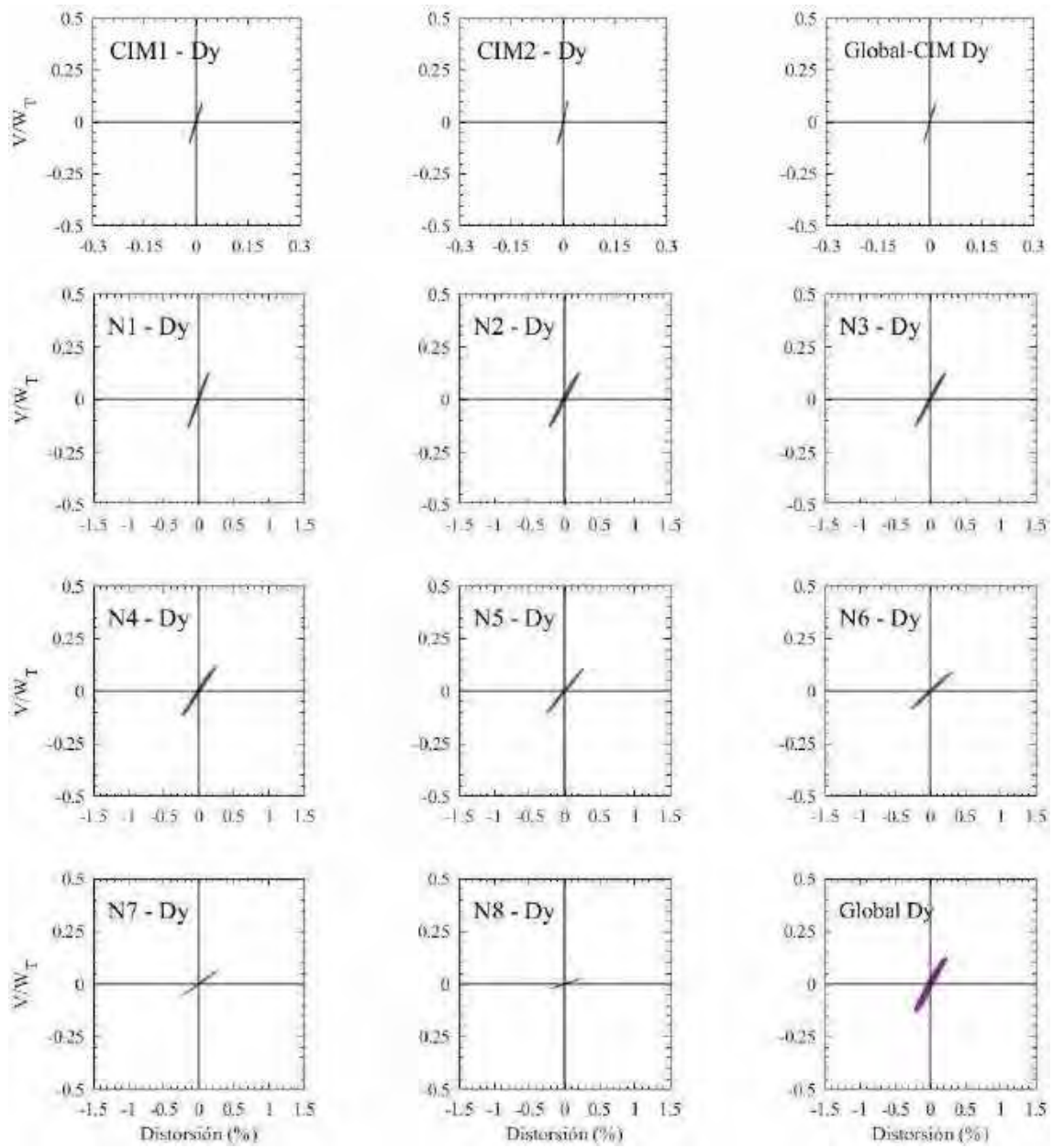


Figura F.191. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración GR27-A (2017)

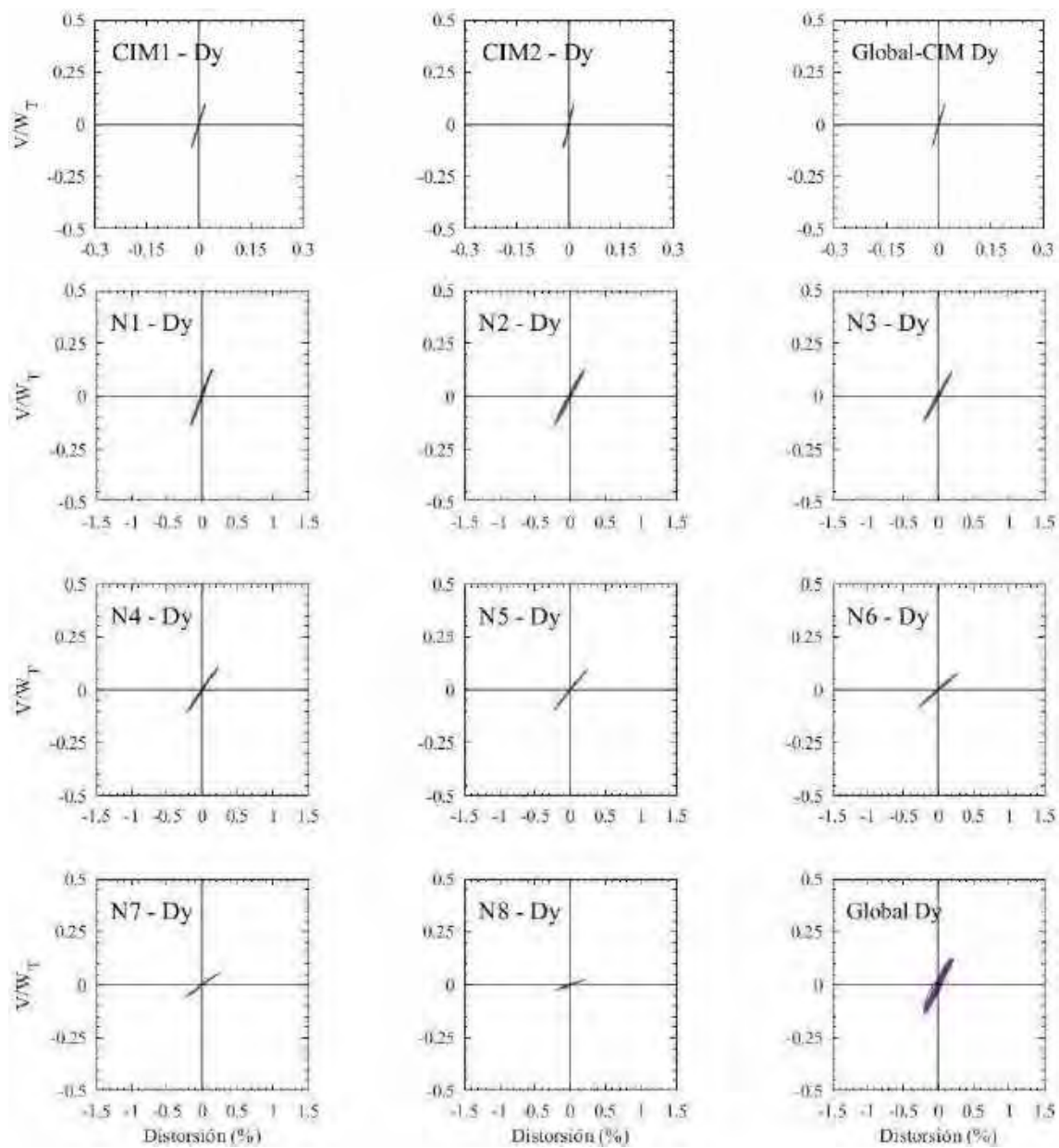
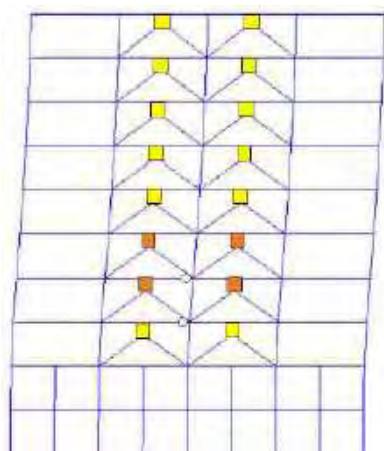
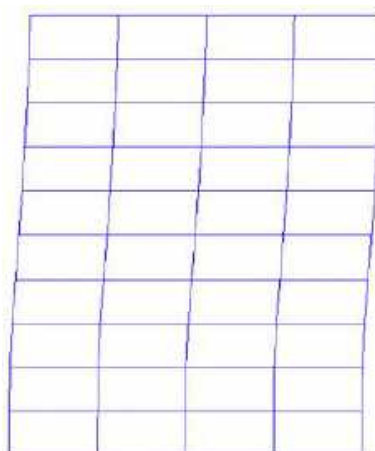


Figura F.192. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.2.5 Mapeos de fluencia en dirección x

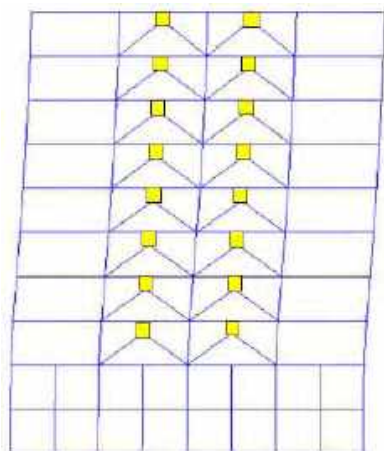


a) Marco perimetral

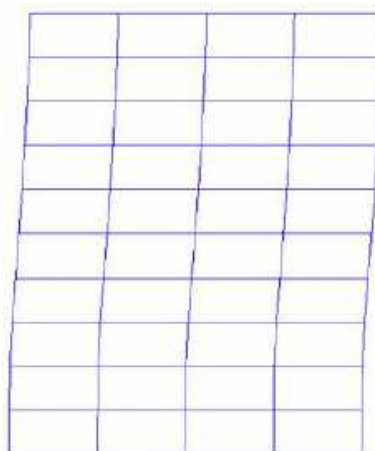


b) Marco interior

Figura F.193. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración AO24-A

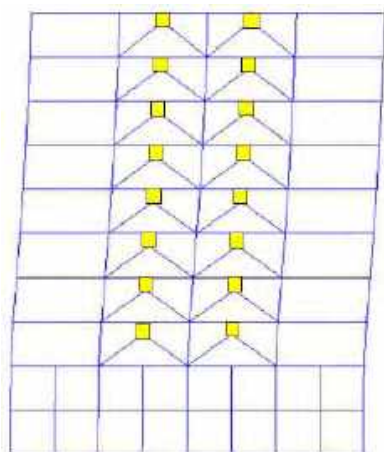


a) Marco perimetral

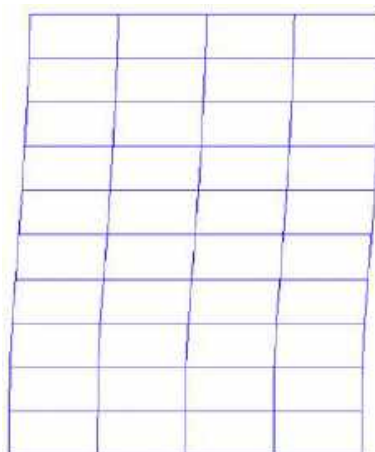


b) Marco interior

Figura F.194. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración AO24-B

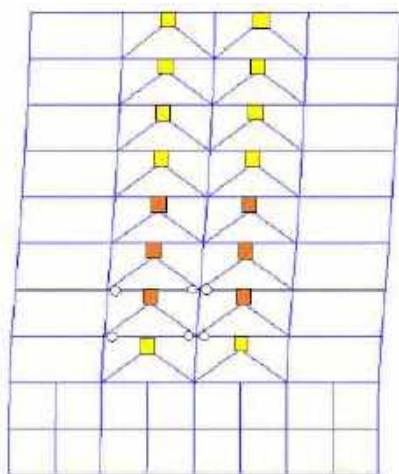


a) Marco perimetral

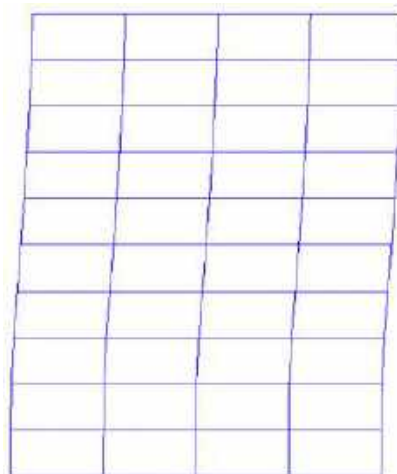


b) Marco interior

Figura F.195. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CLRT-A

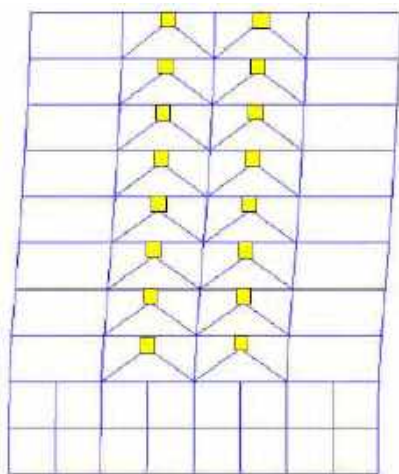


a) Marco perimetral

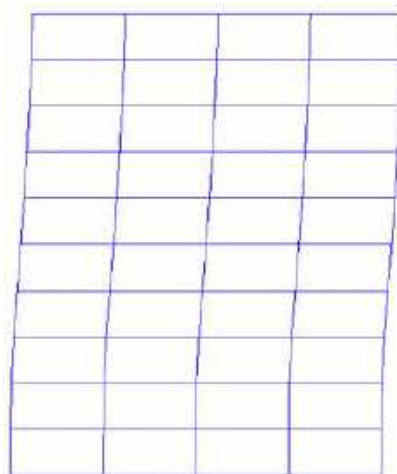


b) Marco interior

Figura F.196. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CLRT-B

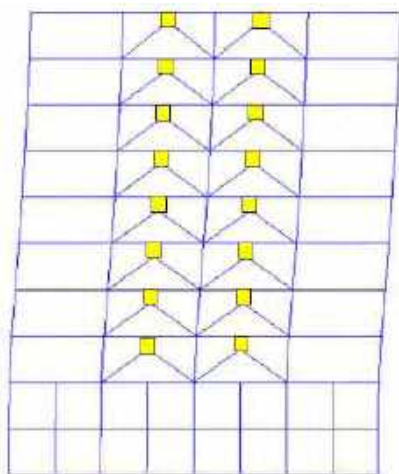


a) Marco perimetral

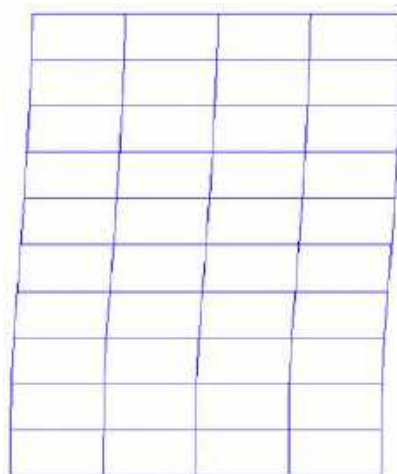


b) Marco interior

Figura F.197. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración COYS-A

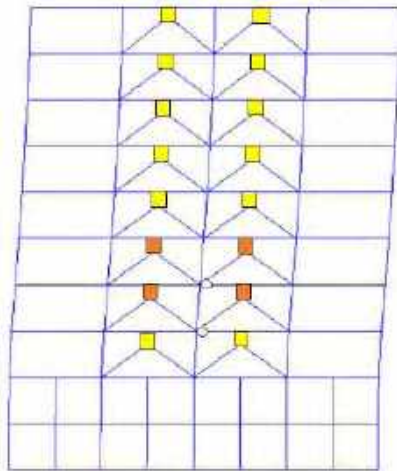


a) Marco perimetral

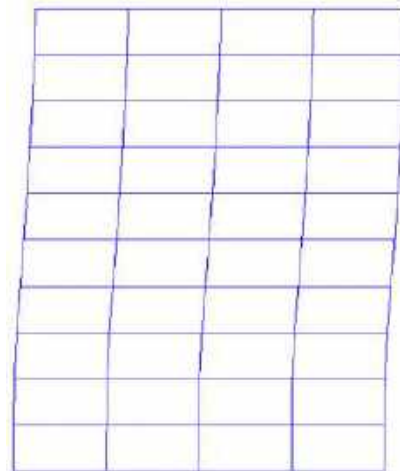


b) Marco interior

Figura F.198. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración COYS-B

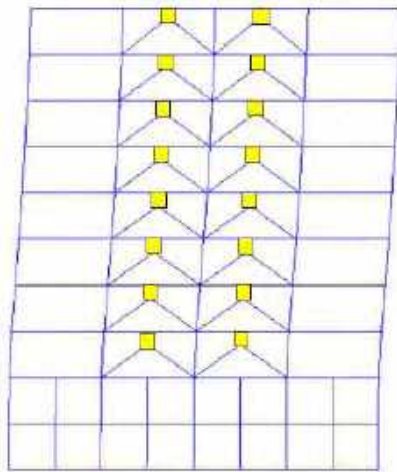


a) Marco perimetral

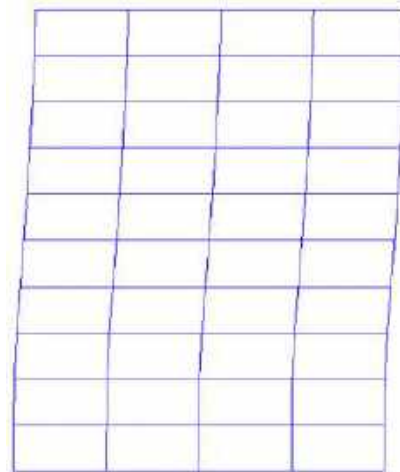


b) Marco interior

Figura F.199. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DR16-A

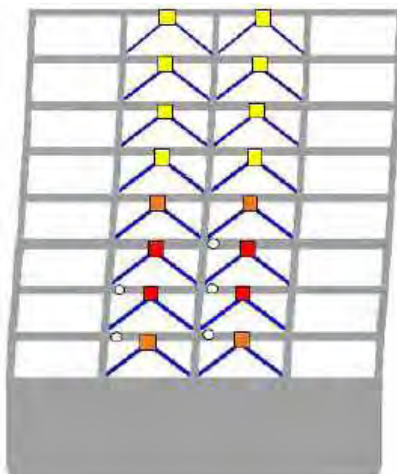


a) Marco perimetral

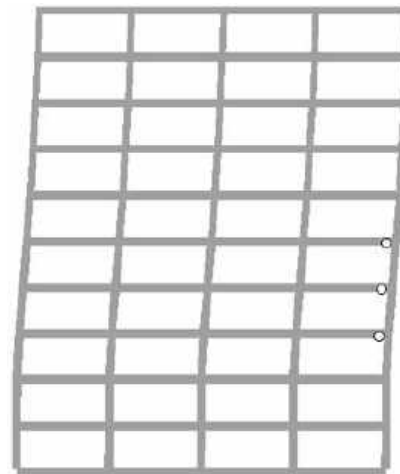


b) Marco interior

Figura F.200. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DR16-B

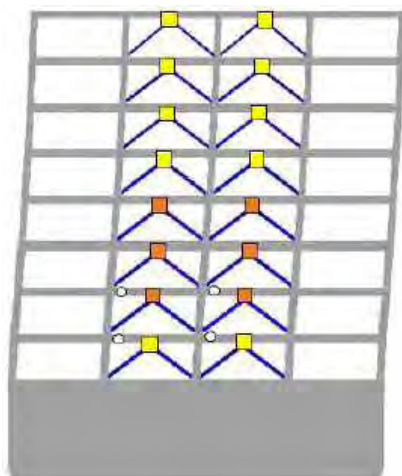


a) Marco perimetral

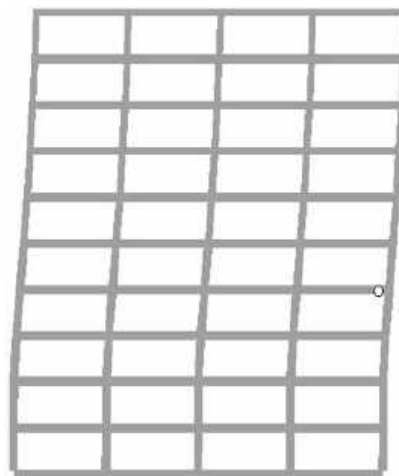


b) Marco interior

Figura F.201. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración EO30-A

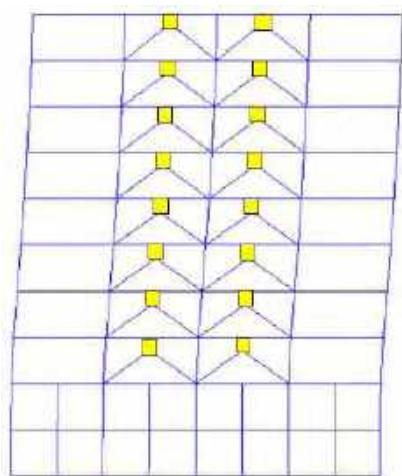


a) Marco perimetral

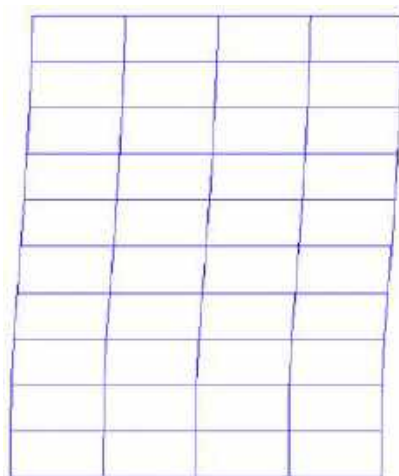


b) Marco interior

Figura F.202. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración EO30-B

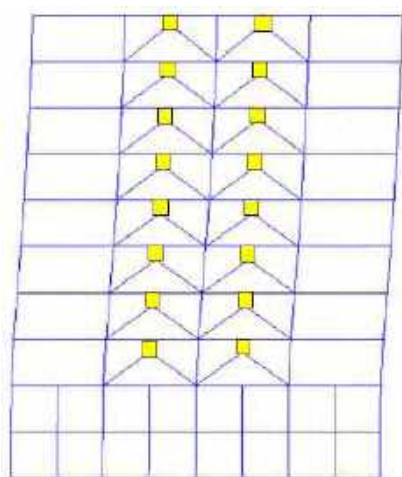


a) Marco perimetral

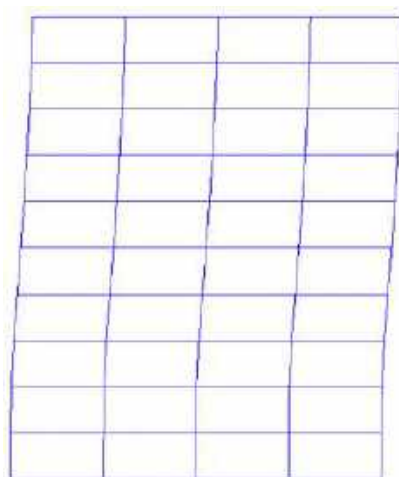


b) Marco interior

Figura F.203. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-A

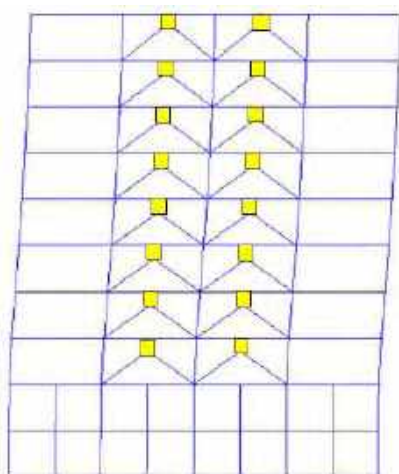


a) Marco perimetral

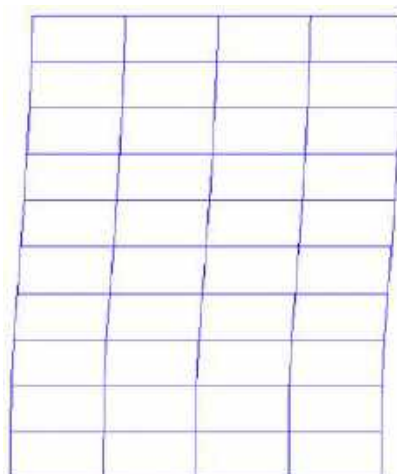


b) Marco interior

Figura F.204. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-B

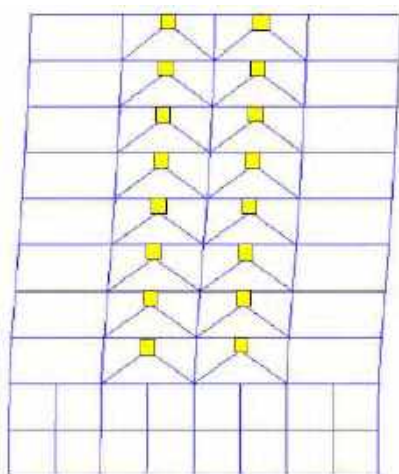


a) Marco perimetral

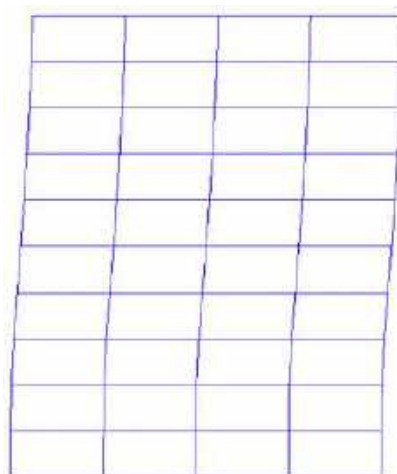


b) Marco interior

Figura F.205. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SXVI-A (1985)

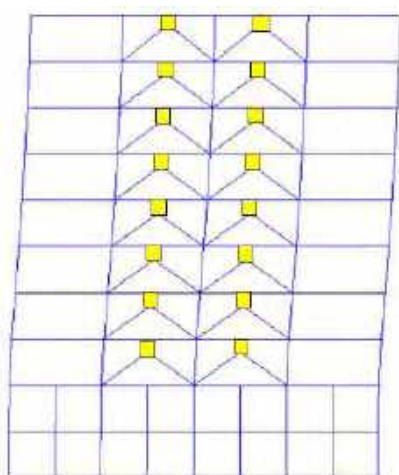


a) Marco perimetral

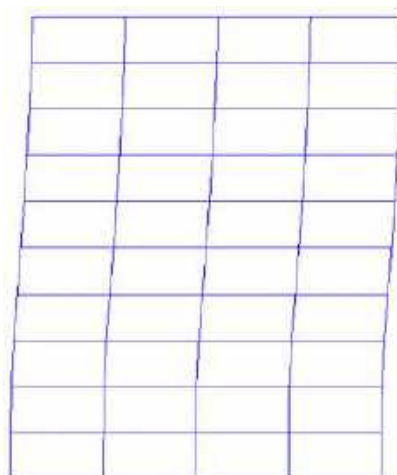


b) Marco interior

Figura F.206. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SXVI -B (1985)

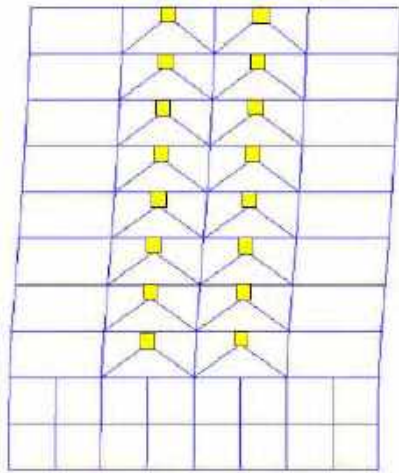


a) Marco perimetral

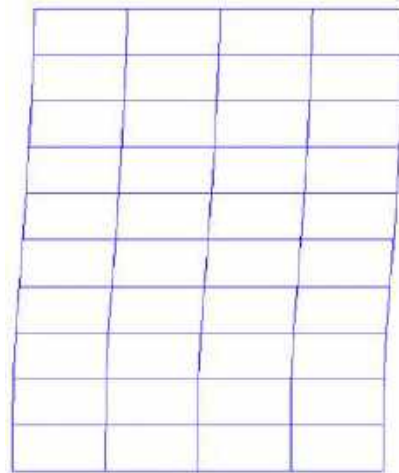


b) Marco interior

Figura F.207. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-A (2017)



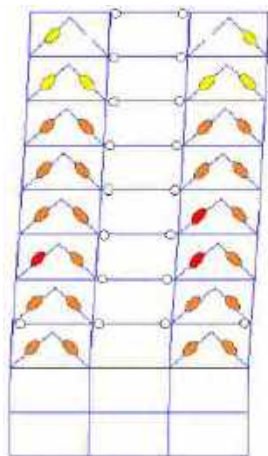
a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura F.208. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.2.6 Mapeos de fluencia en dirección y

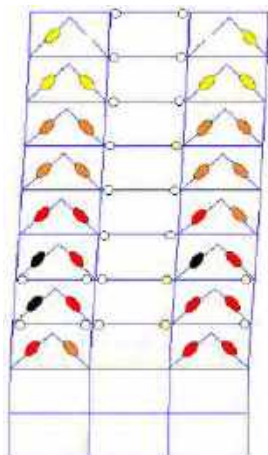


a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura F.209. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración AO24-A

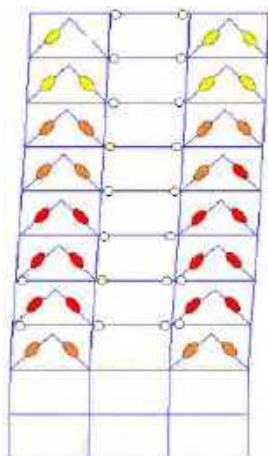


a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura F.210. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración AO24-B

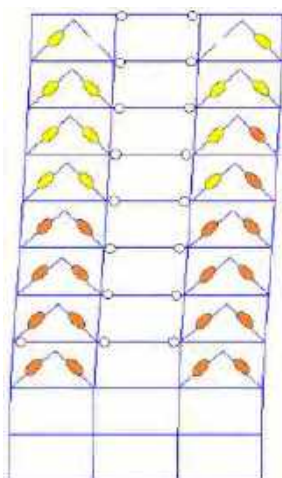


a) Marco perimetral

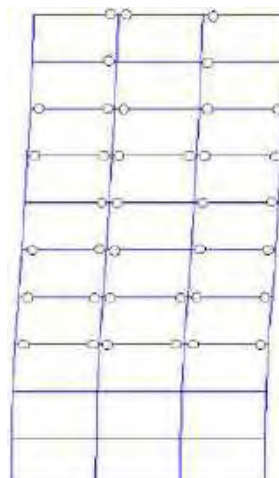


b) Marco interior

Figura F.211. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CLRT-A

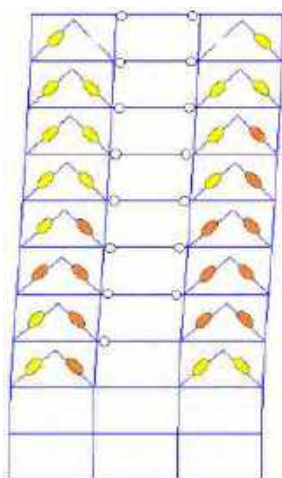


a) Marco perimetral

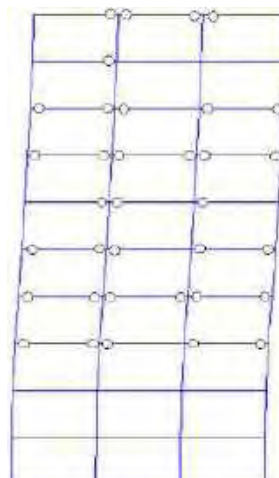


b) Marco interior

Figura F.212. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CLRT-B

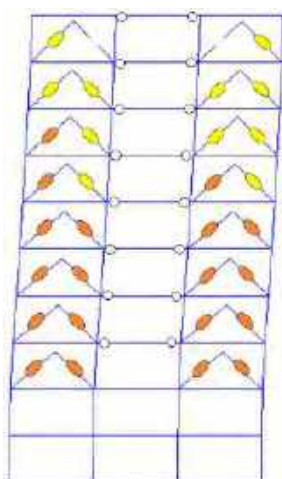


a) Marco perimetral

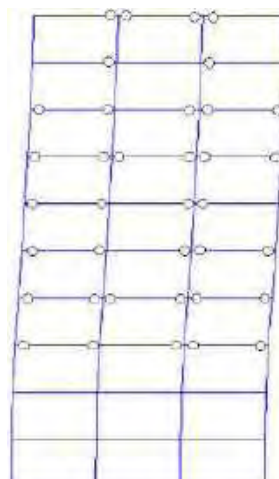


b) Marco interior

Figura F.213. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración COYS-A

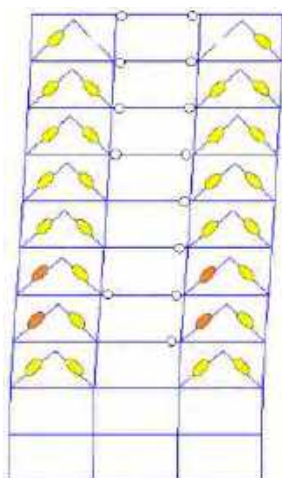


a) Marco perimetral

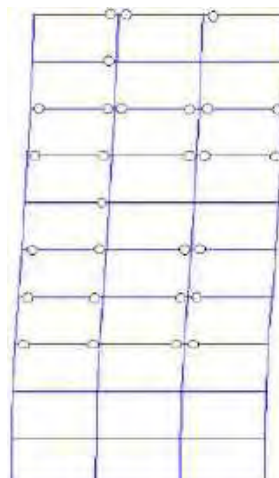


b) Marco interior

Figura F.214. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración COYS-B

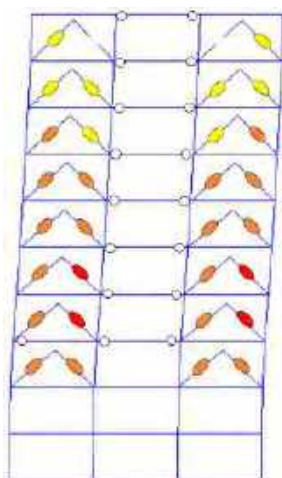


a) Marco perimetral

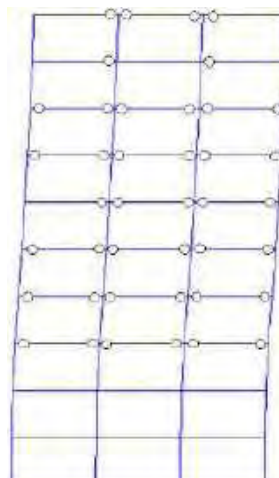


b) Marco interior

Figura F.215. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DR16-A

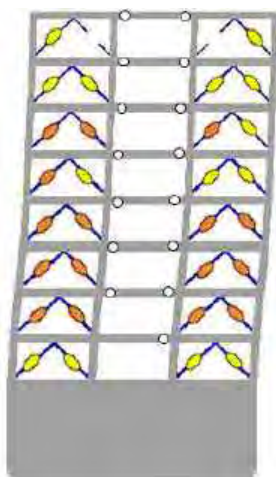


a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura F.216. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DR16-B

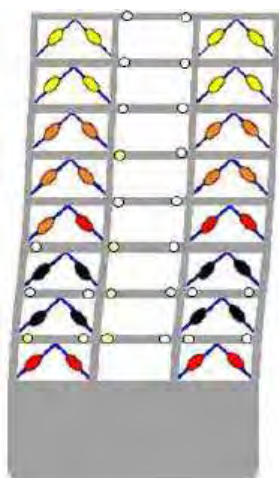


a) Marco perimetral

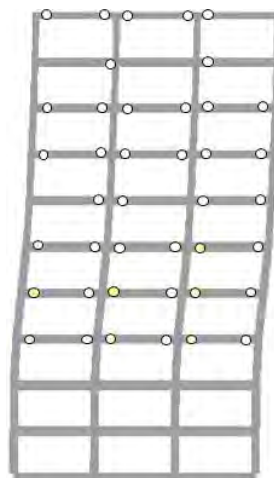


b) Marco interior

Figura F.217. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración EO30-A

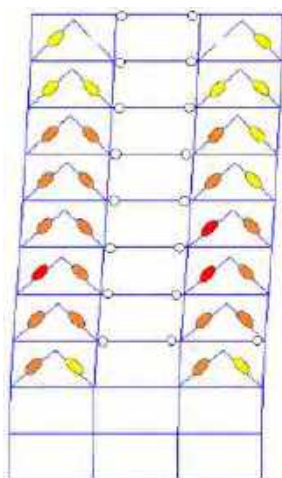


a) Marco perimetral

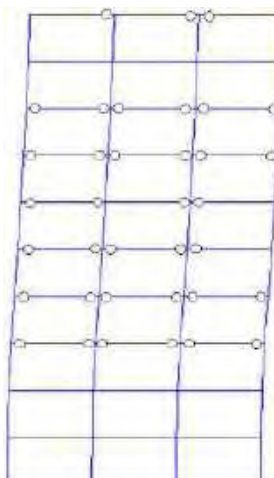


b) Marco interior

Figura F.218. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración EO30-B

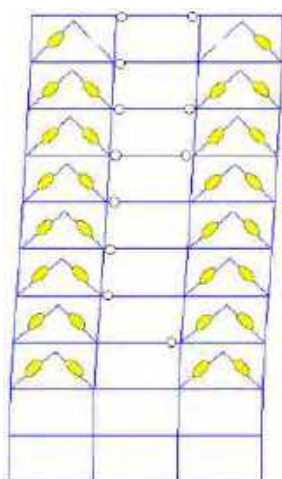


a) Marco perimetral

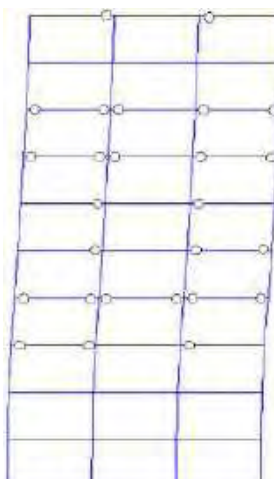


b) Marco interior

Figura F.219. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-A

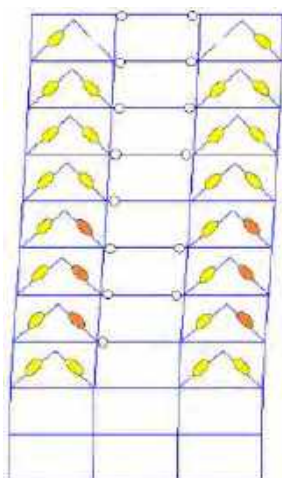


a) Marco perimetral

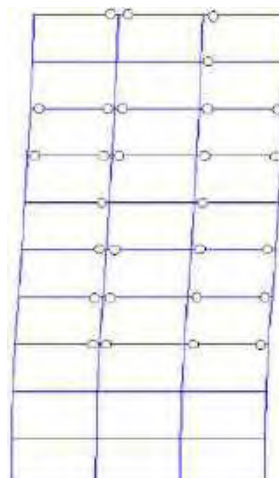


b) Marco interior

Figura F.220. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-B

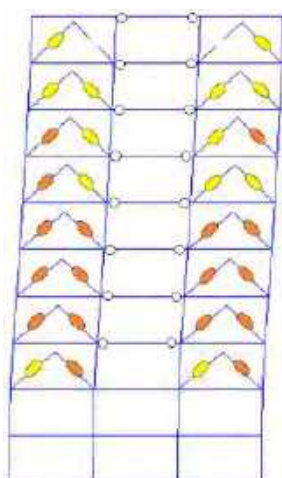


a) Marco perimetral

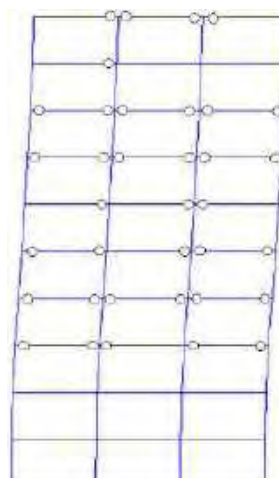


b) Marco interior

Figura F.221. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SXVI-A (1985)

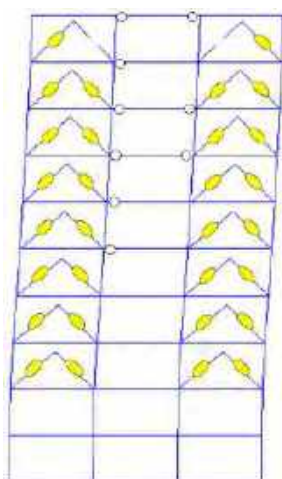


a) Marco perimetral

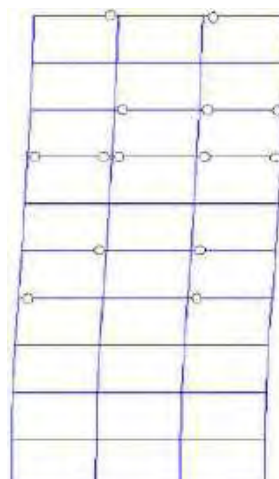


b) Marco interior

Figura F.222. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SXVI-B (1985)

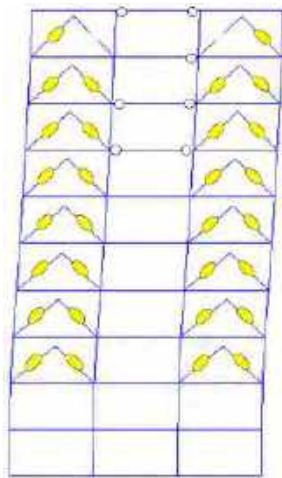


a) Marco perimetral

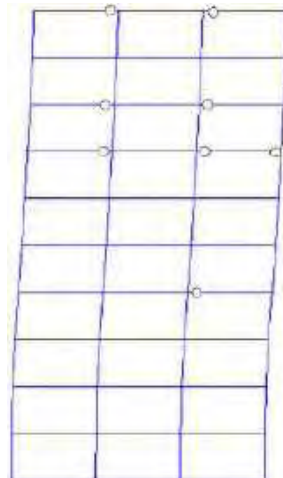


b) Marco interior

Figura F.223. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-A (2017)



a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura F.224. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.2.7 Respuesta Global

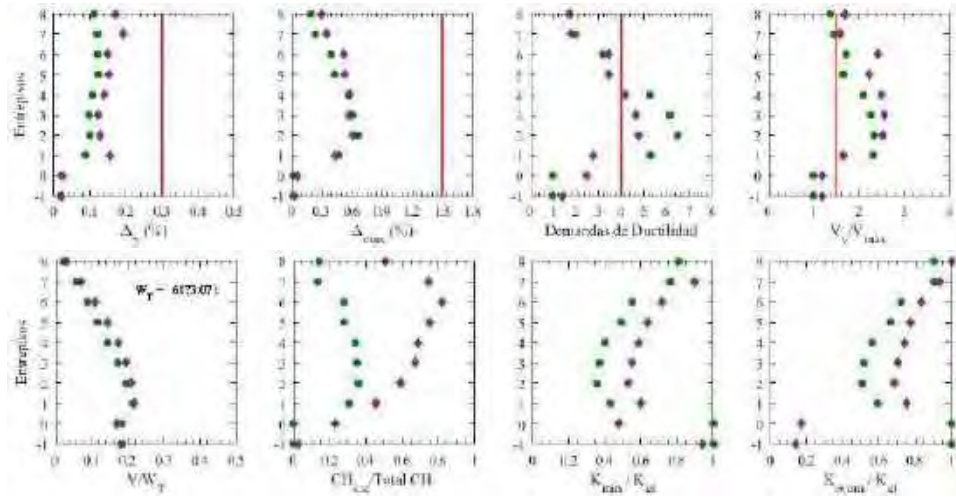


Figura F.225. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración AO24-A

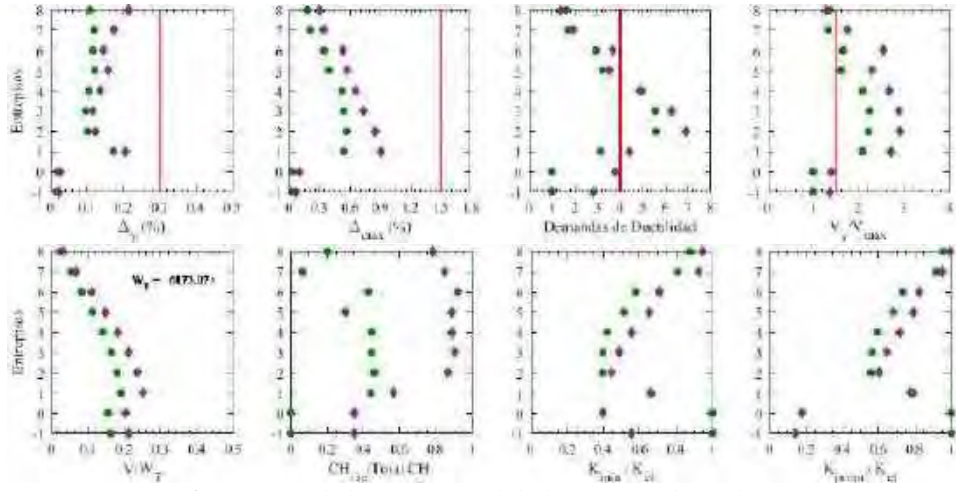


Figura F.226. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración AO24-B

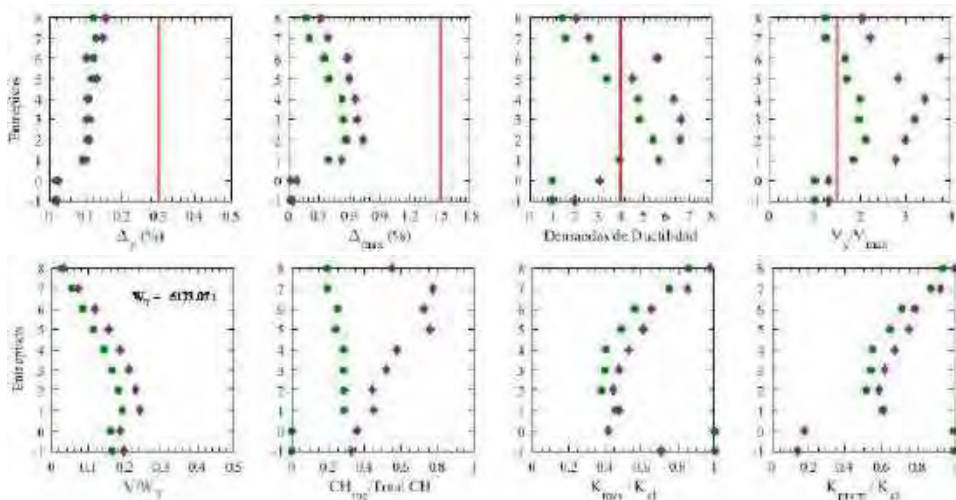


Figura F.227. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CLRT-A

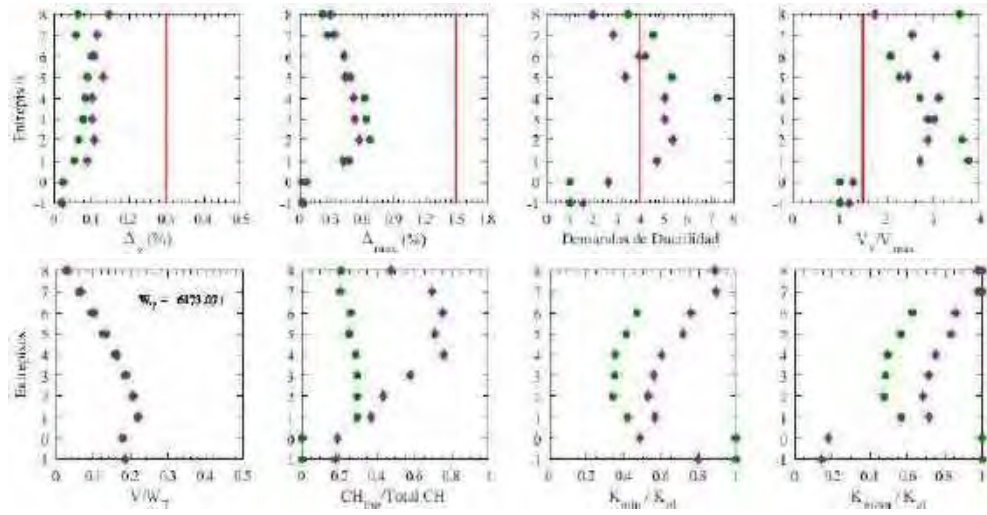


Figura F.228. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CLRT-B

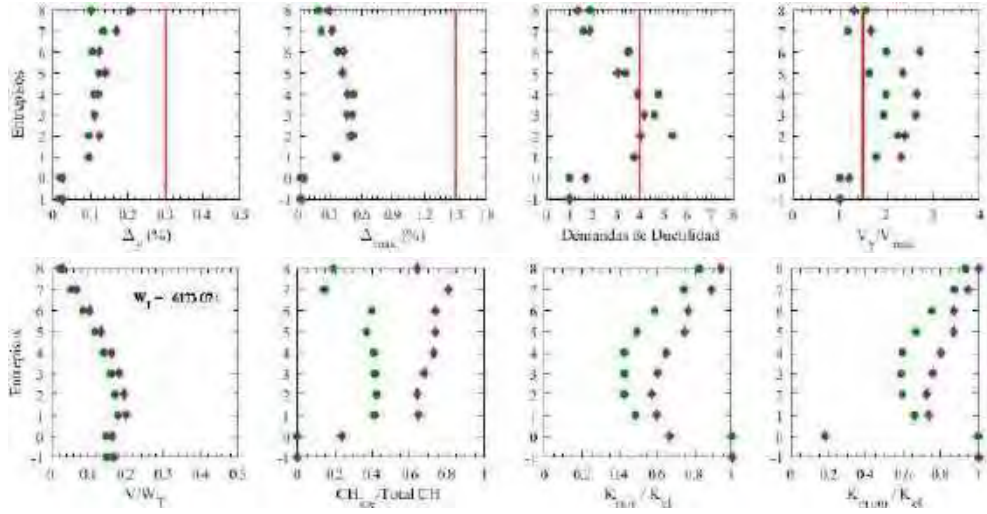


Figura F.229. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración COYS-A

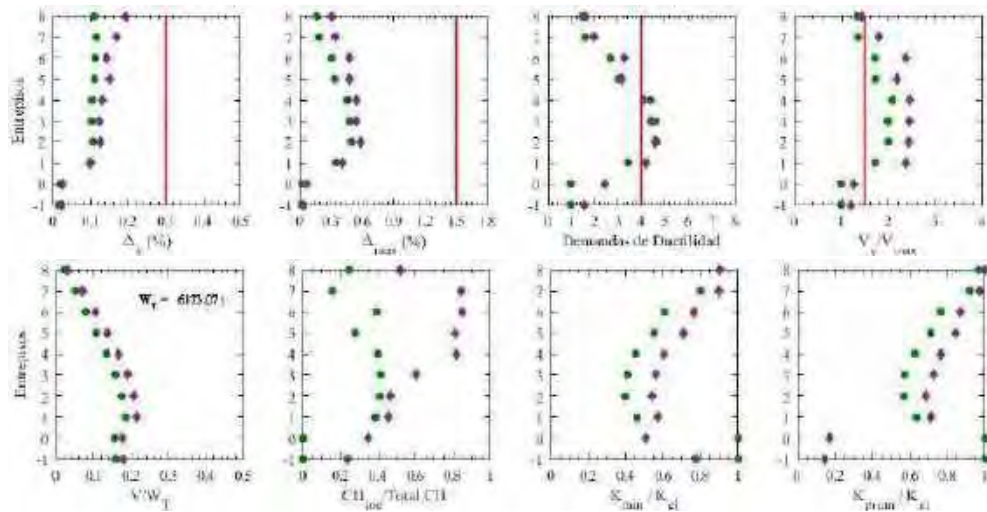


Figura F.230. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración COYS-B

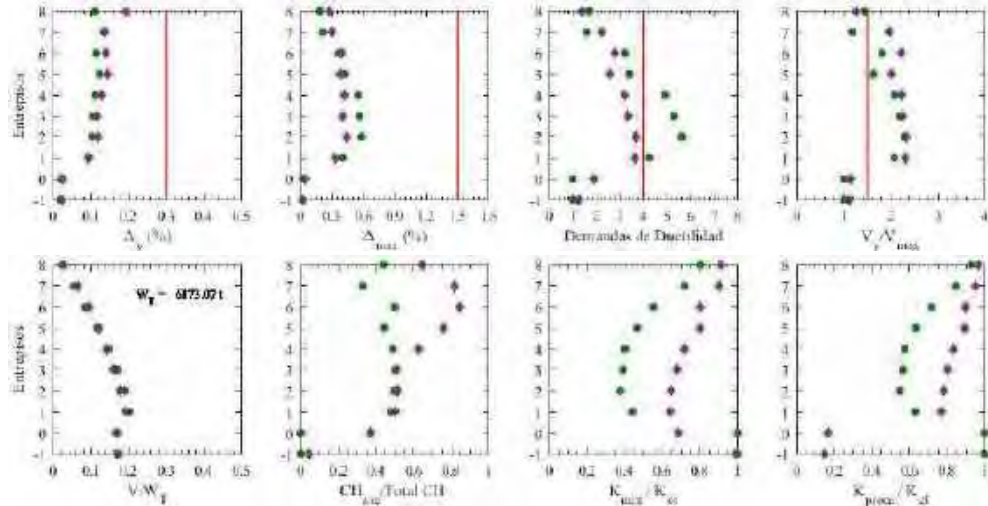


Figura F.231. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DR16-A

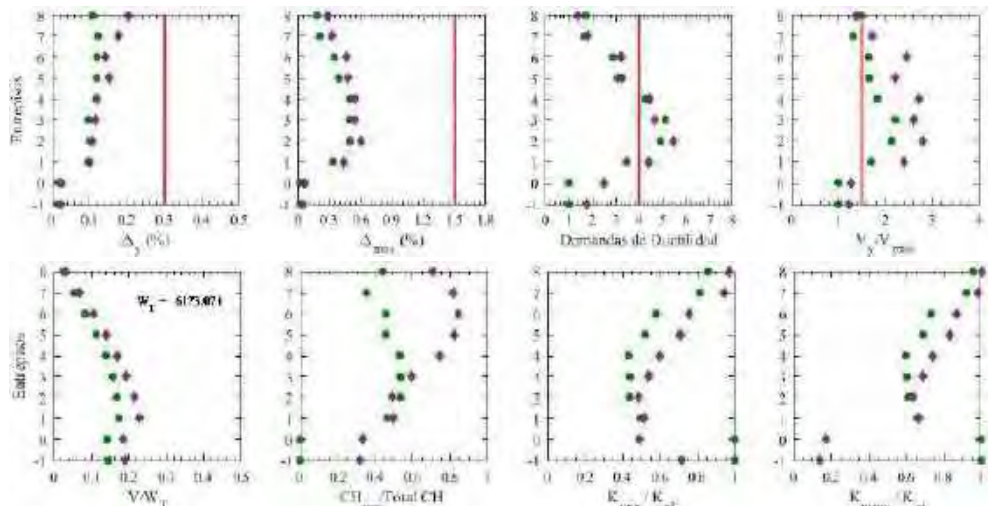


Figura F.232. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DR16-B

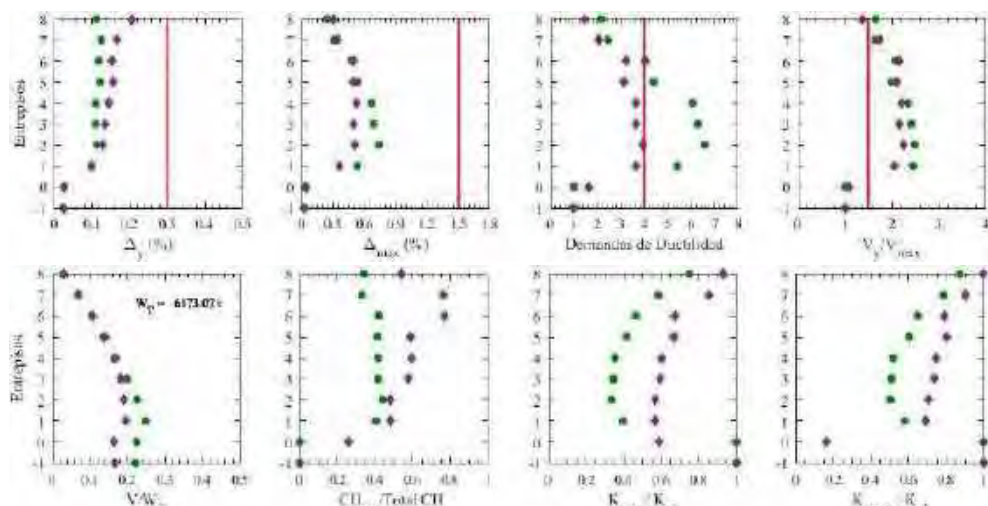


Figura F.233. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración EO30-A

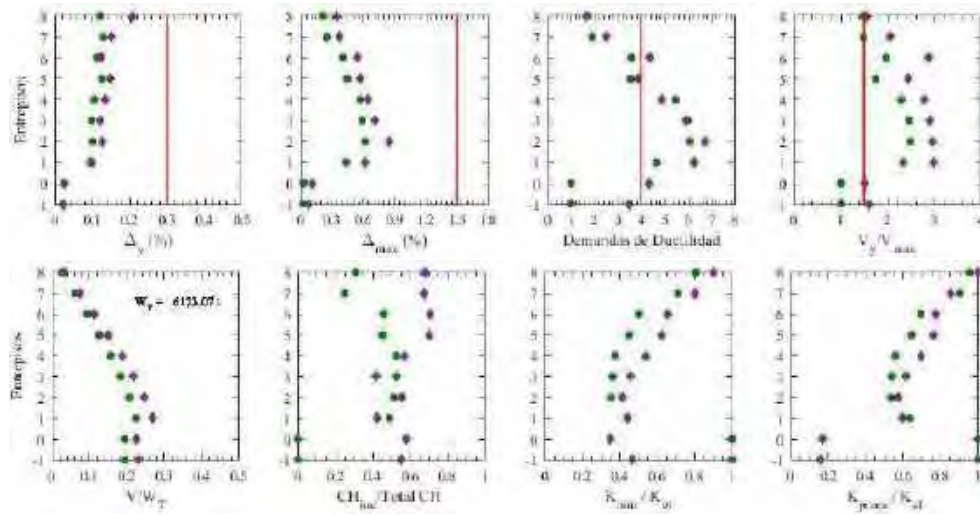


Figura F.234. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración EO30-B

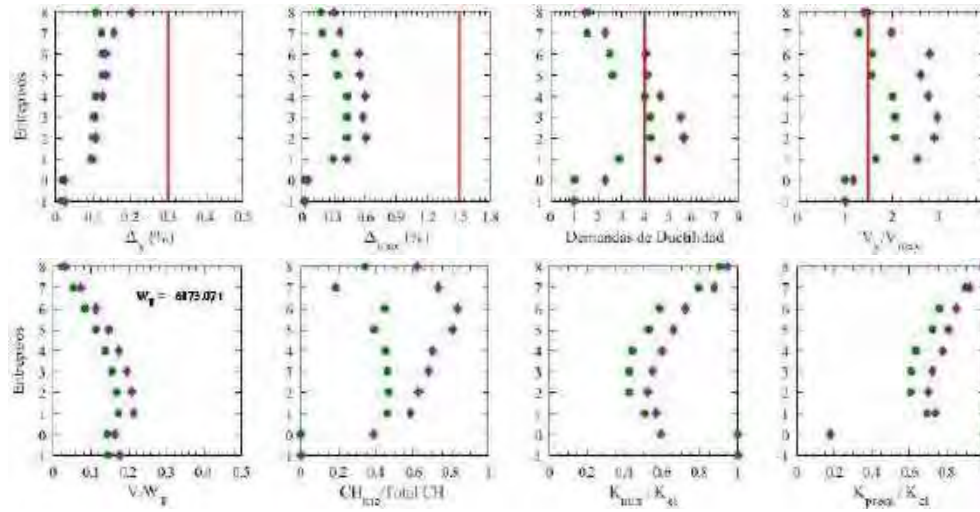


Figura F.235. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración GR27-A

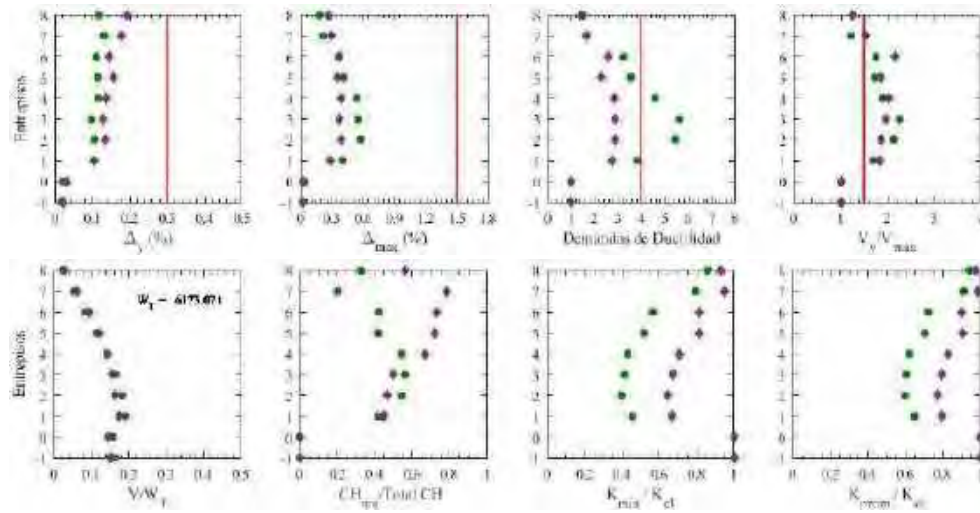


Figura F.236. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración GR27-B

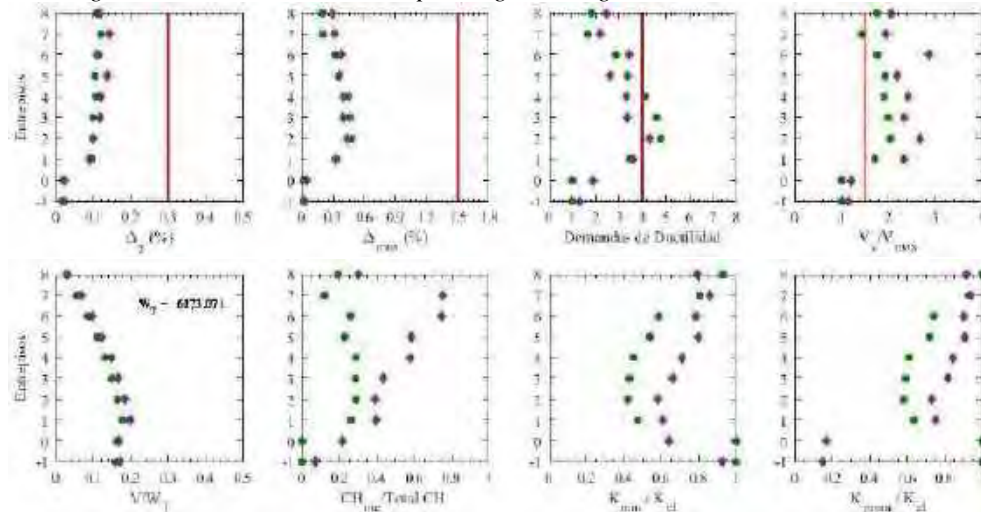


Figura F.237. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración SXVI-A (1985)

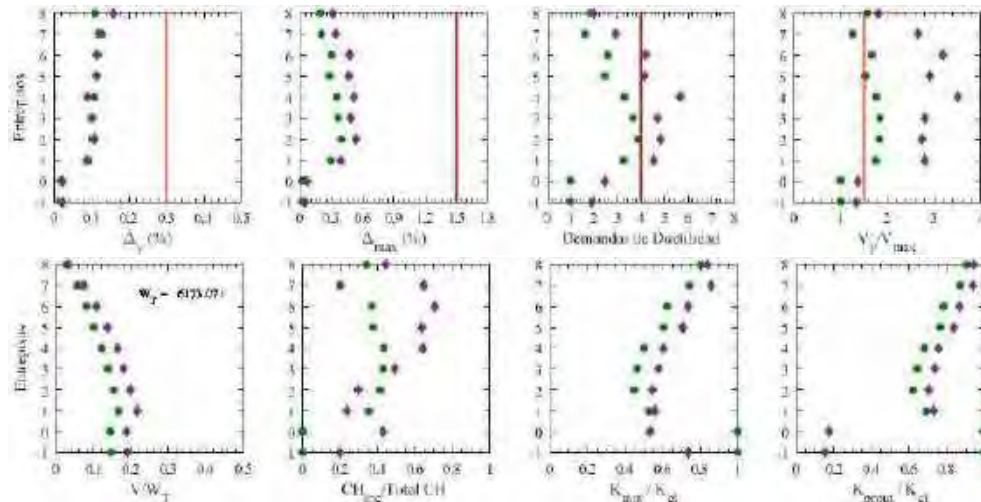


Figura F.238. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración SXVI-B (1985)

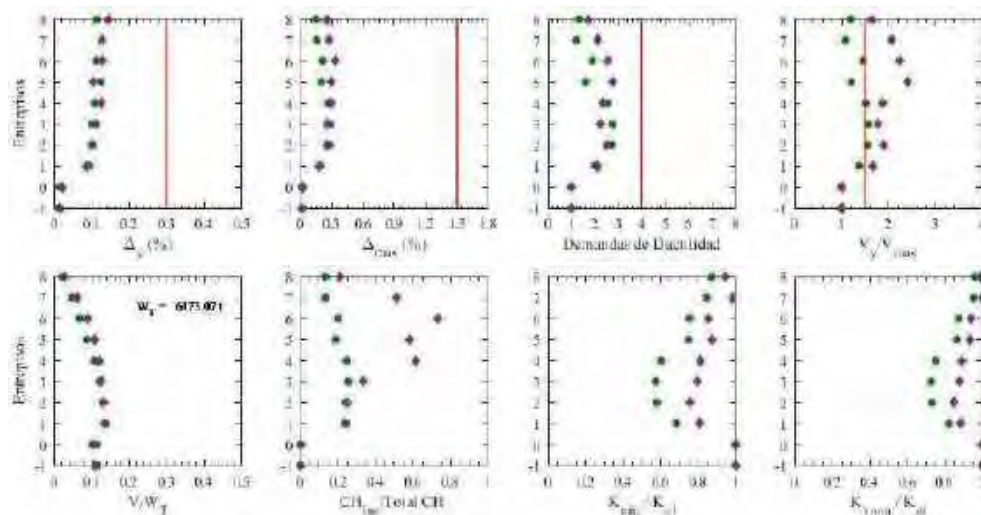


Figura F.239. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración GR27-A (2017)

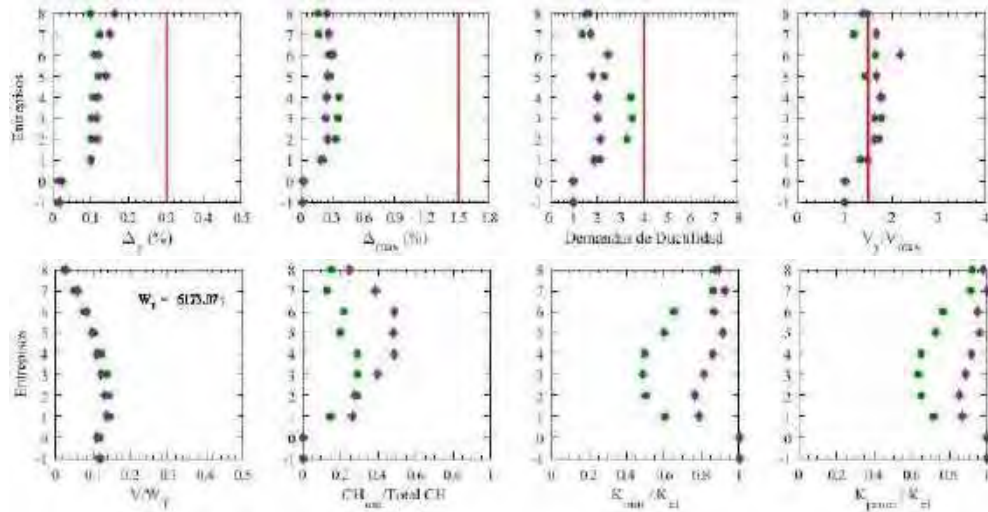


Figura F.240. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración GR27-B (2017)

F.2.8 Distorsiones Residuales

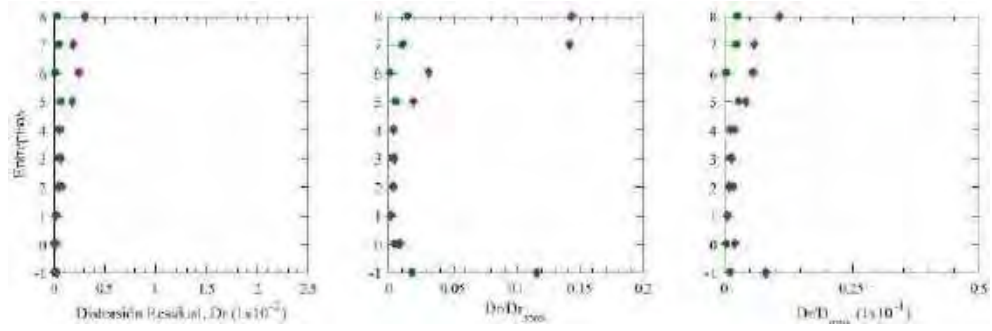


Figura F.241. Distorsiones residuales, registros de aceleración AO24-A

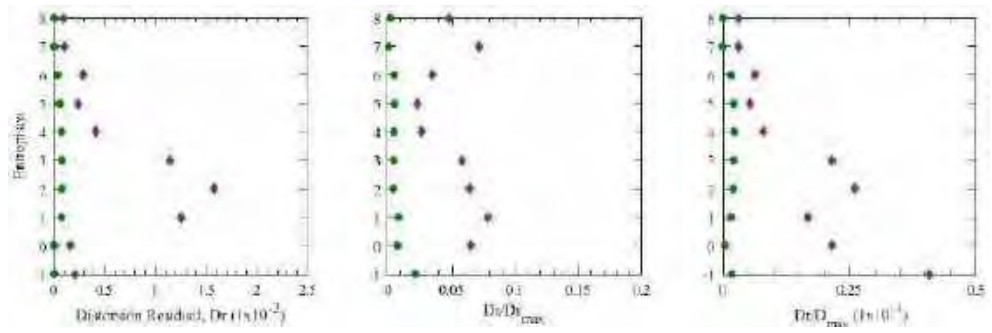


Figura F.242. Distorsiones residuales, registros de aceleración AO24-B

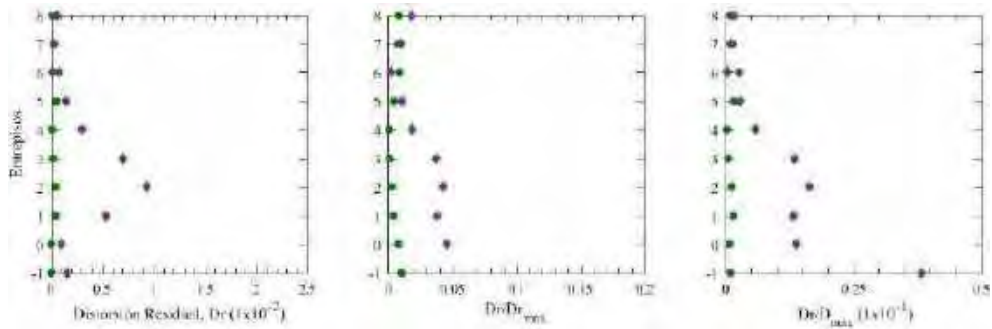


Figura F.243. Distorsiones residuales, registros de aceleración CLRT-A

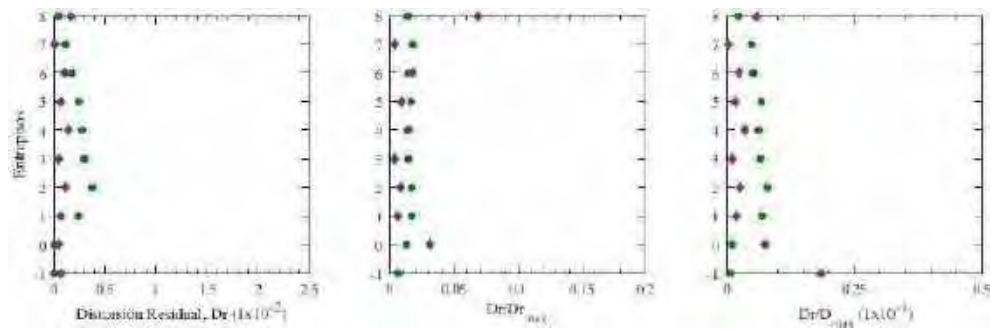


Figura F.244. Distorsiones residuales, registros de aceleración CLRT-B

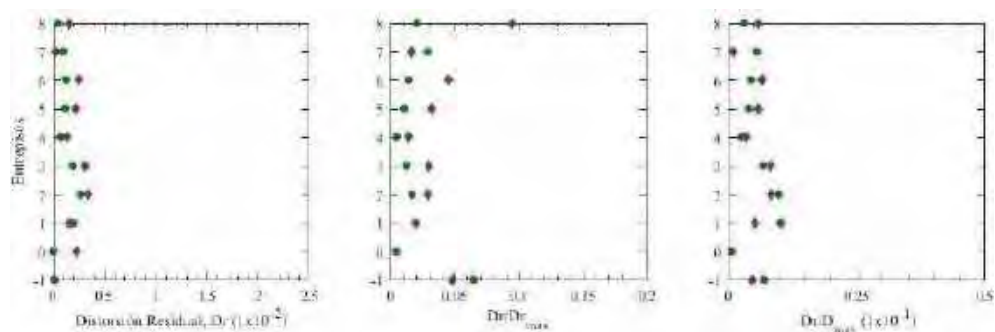


Figura F.245. Distorsiones residuales, registros de aceleración COYS-A

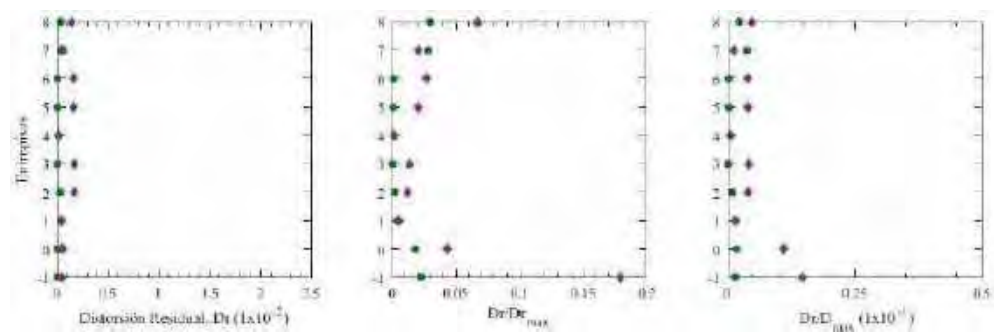


Figura F.246. Distorsiones residuales, registros de aceleración COYS-B

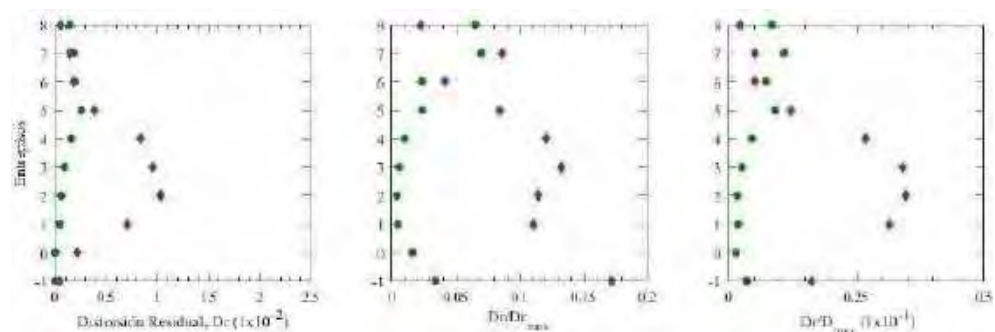


Figura F.247. Distorsiones residuales, registros de aceleración DR16-A

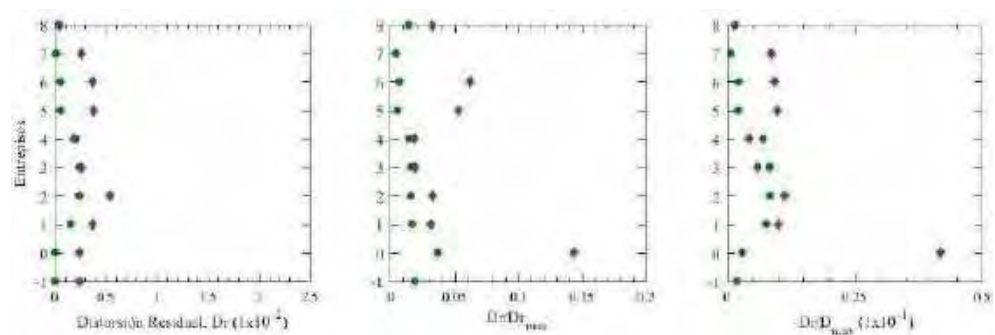


Figura F.248. Distorsiones residuales, registros de aceleración DR16-B

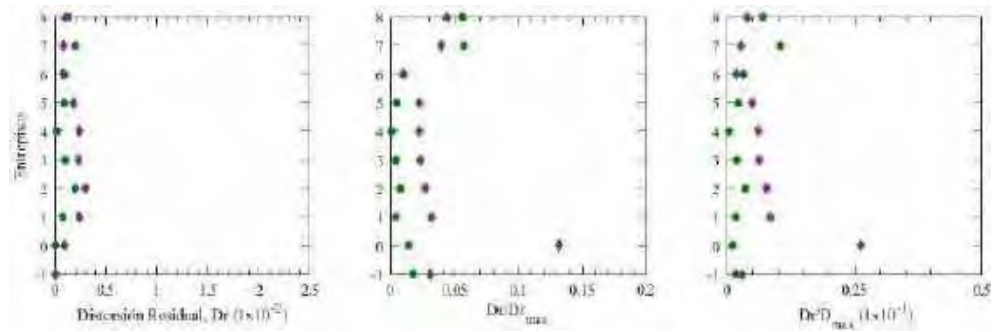


Figura F.249. Distorsiones residuales, registros de aceleración EO30-A

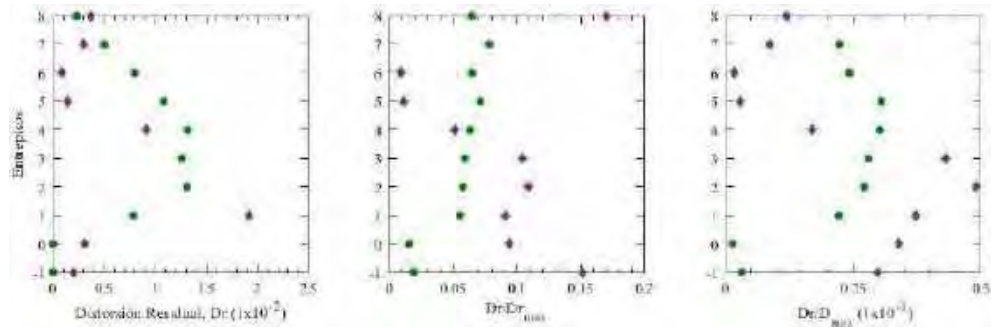


Figura F.250. Distorsiones residuales, registros de aceleración EO30-B

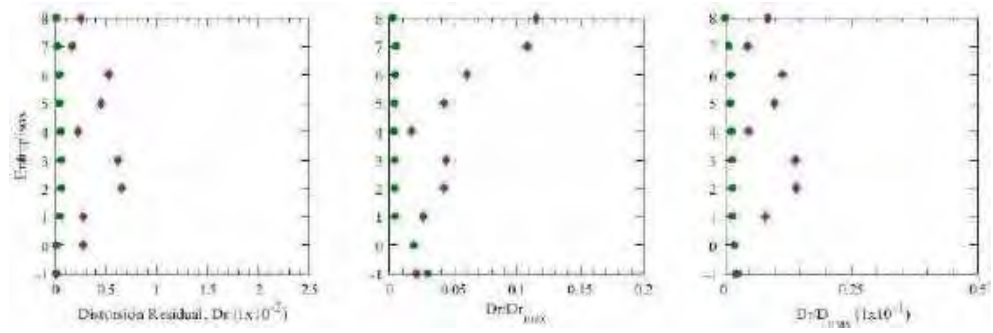


Figura F.251. Distorsiones residuales, registros de aceleración GR27-A

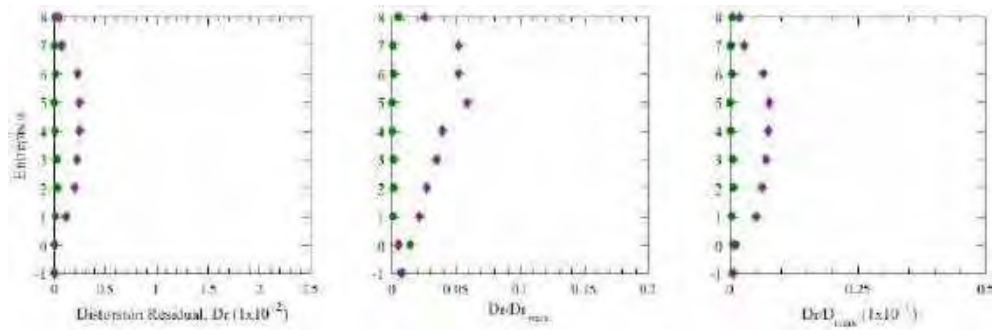


Figura F.252. Distorsiones residuales, registros de aceleración GR27-B

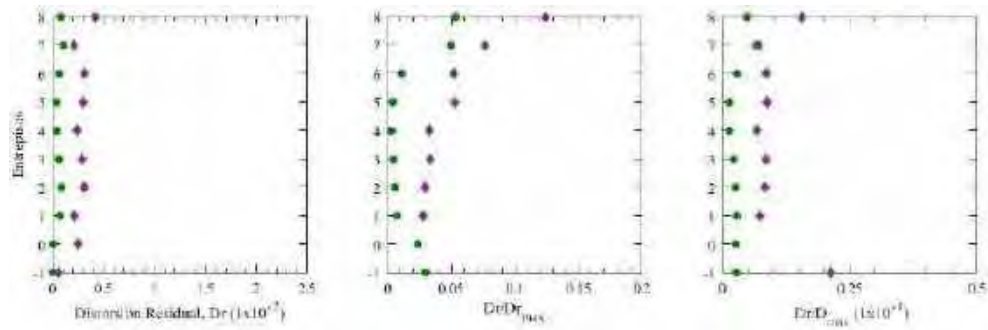


Figura F.253. Distorsiones residuales, registros de aceleración SXVI-A (1985)

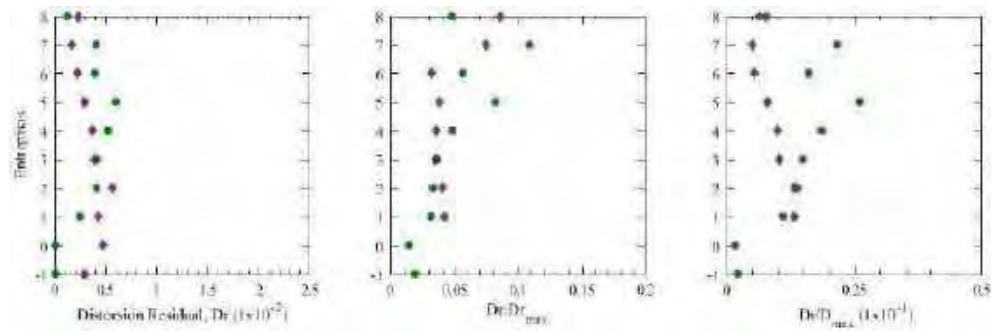


Figura F.254. Distorsiones residuales, registros de aceleración SXVI-B (1985)

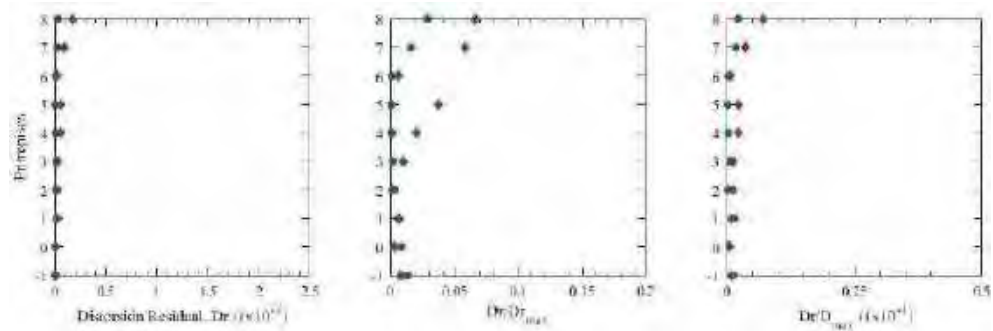


Figura F.255. Distorsiones residuales, registros de aceleración GR27-A (2017)

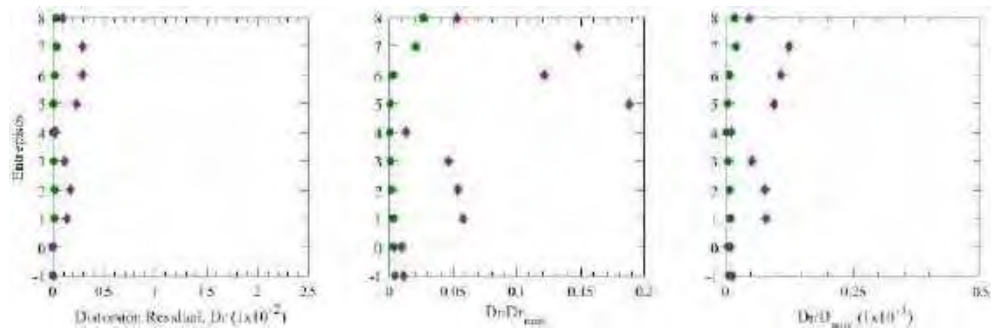


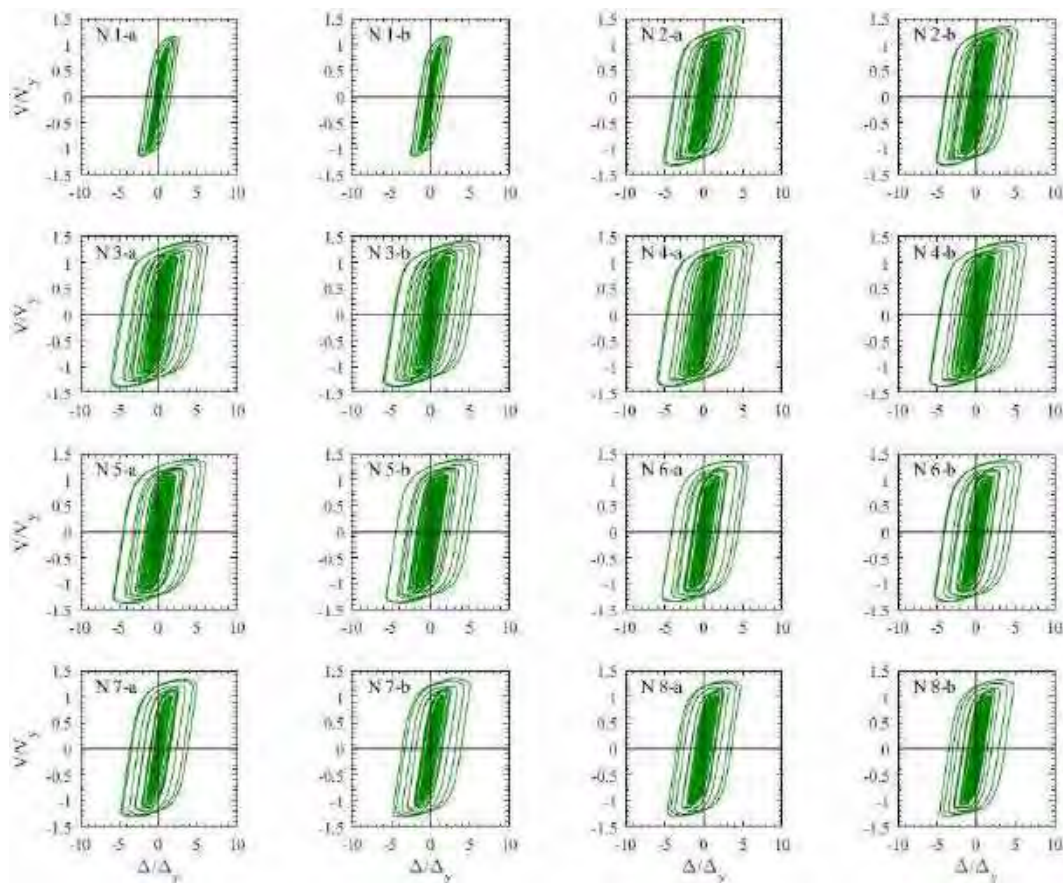
Figura F.256. Distorsiones residuales, registros de aceleración GR27-B (2017)

17. Apéndice G. Resultados para edificio de 15 entrepisos con análisis dinámicos paso a paso no lineales

A continuación se presentan todos los resultados generados por los ocho pares de registros de aceleración, representativos de la zona IIIa, inducidos de manera simultánea a los edificios con 15 entrepisos; se presentan aquéllos considerando su base como rígida, así como también los obtenidos tomando en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura.

G.1 Base Rígida

G.1.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS



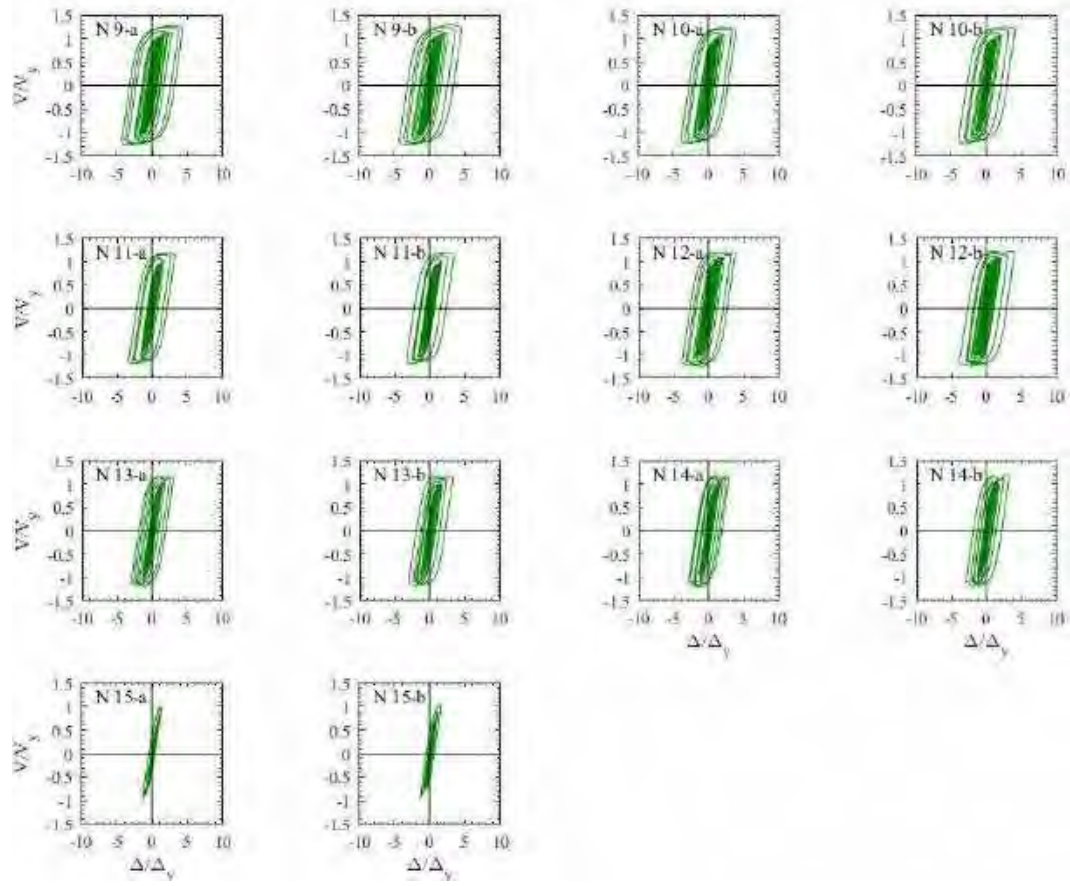


Figura G.1. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CM-A

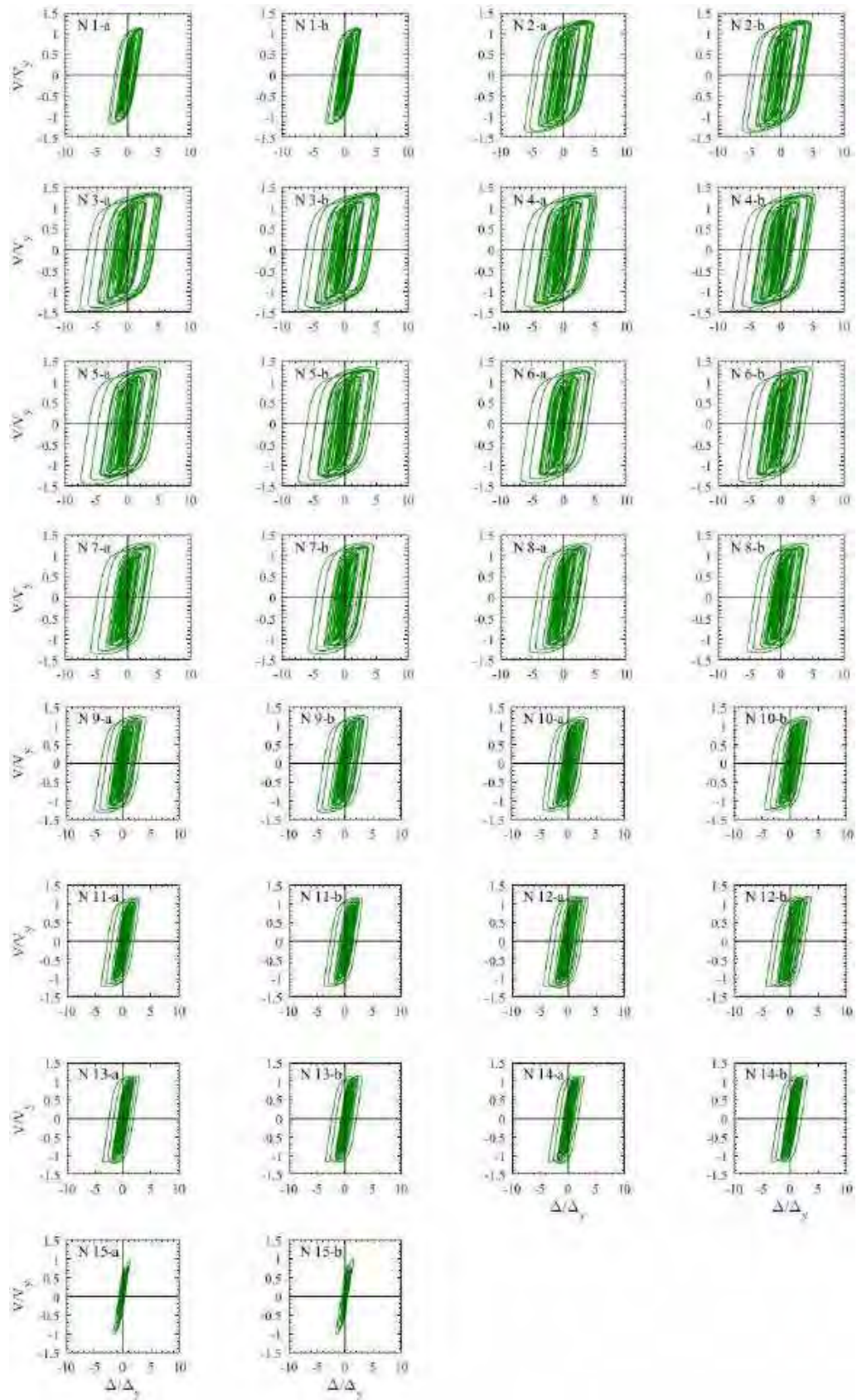


Figura G.2. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CM-B

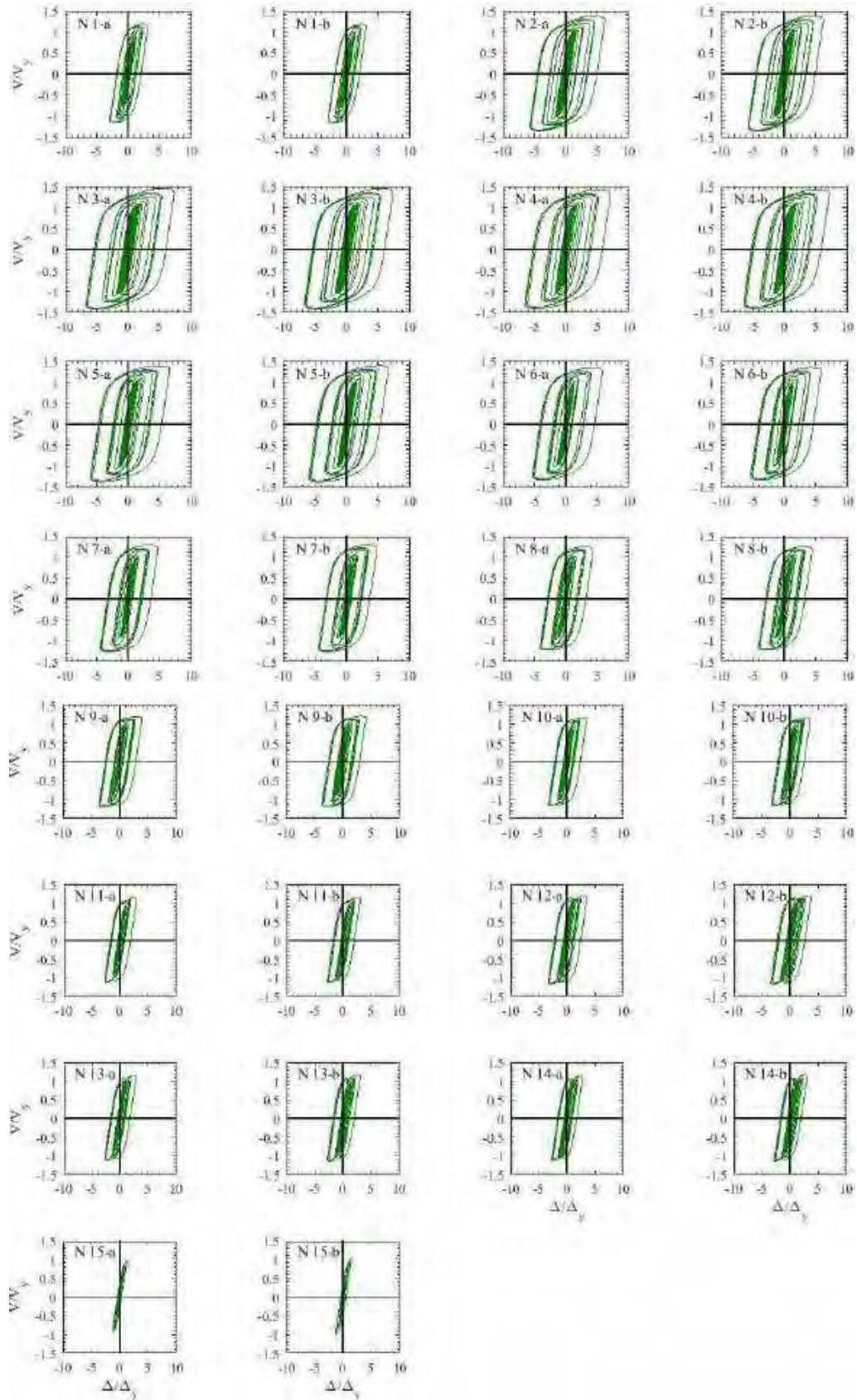


Figura G.3. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DFRO-A

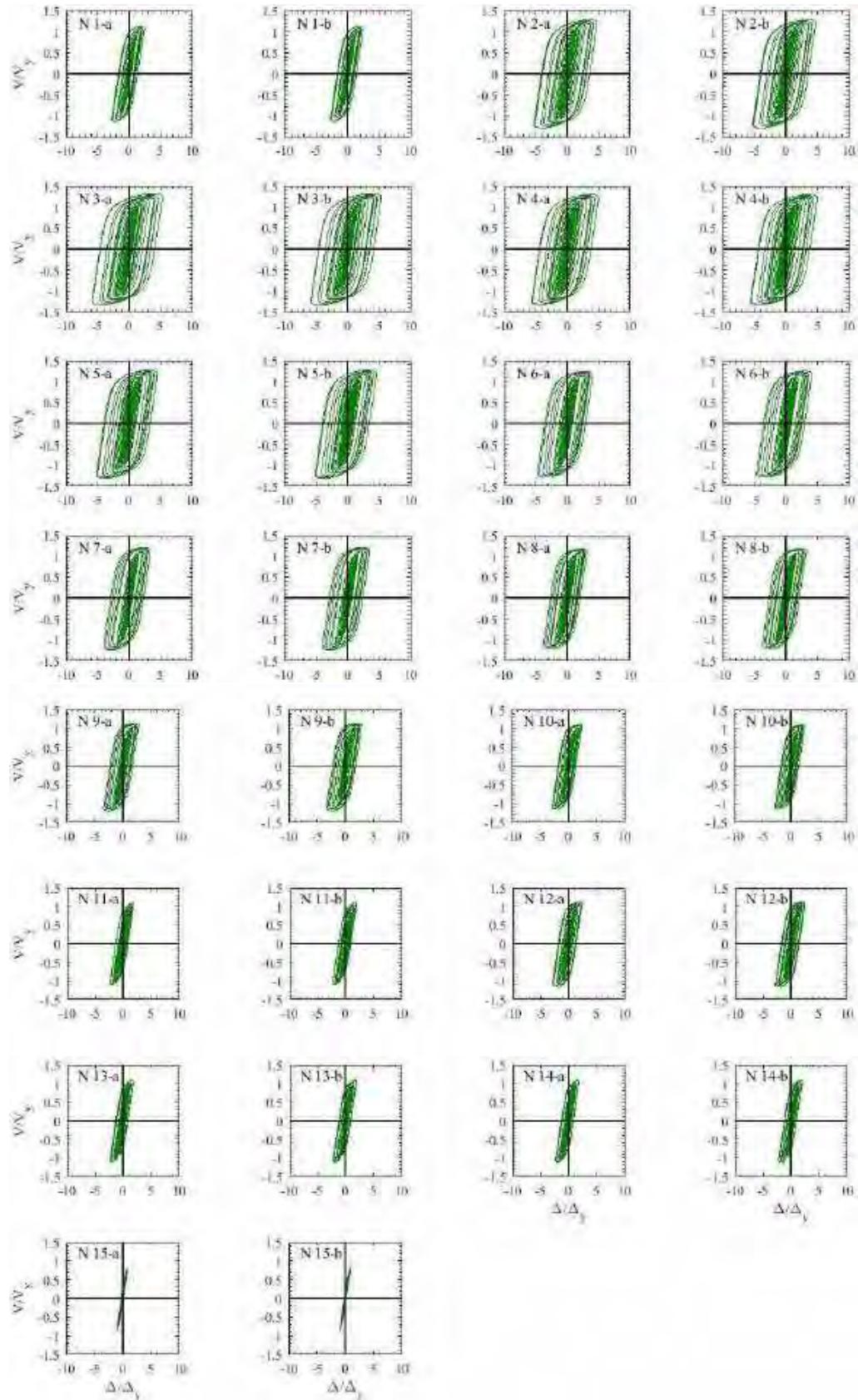


Figura G.4. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DFRO –B

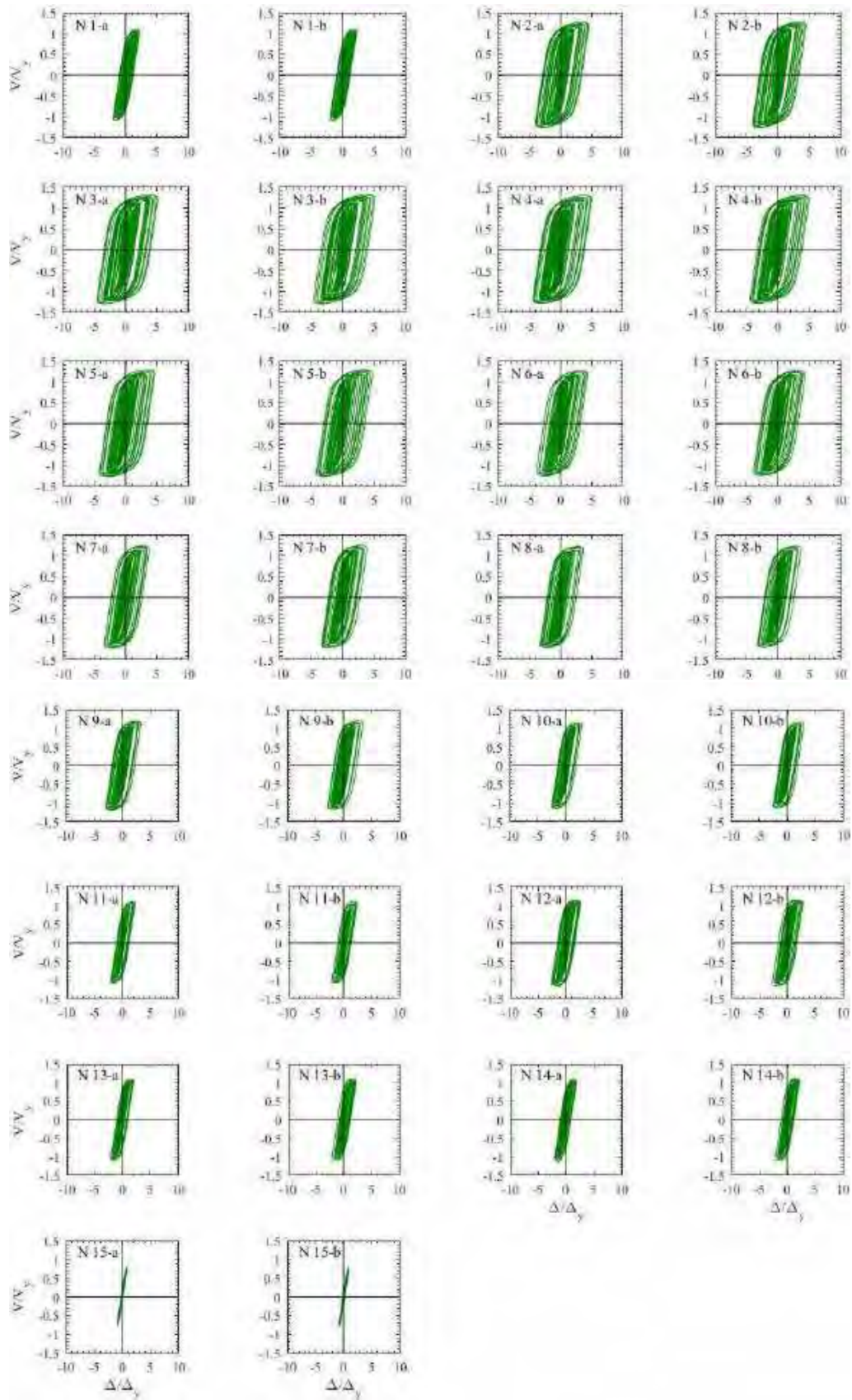


Figura G.5. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración IMSR-A

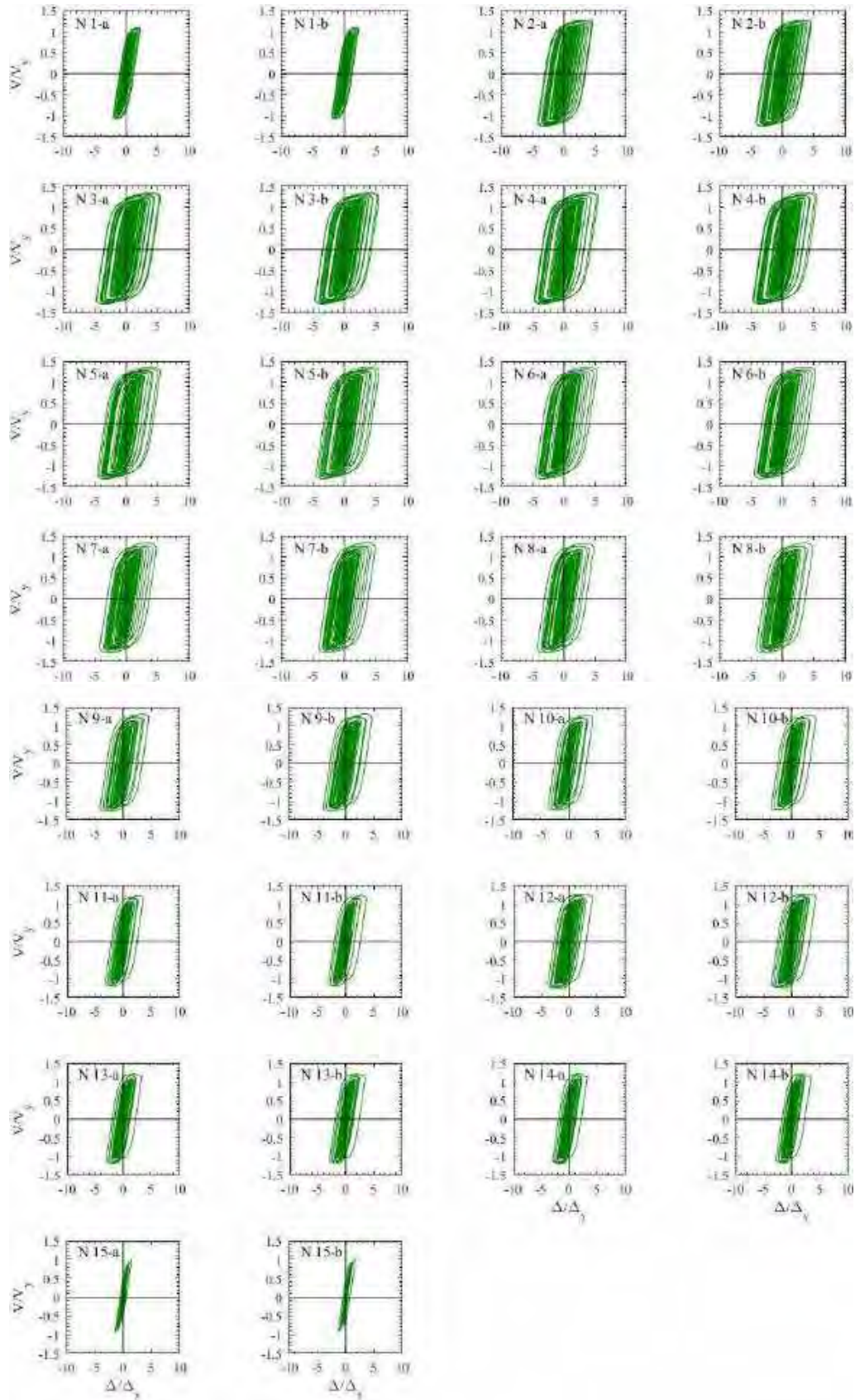


Figura G.6. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración IMSR –B

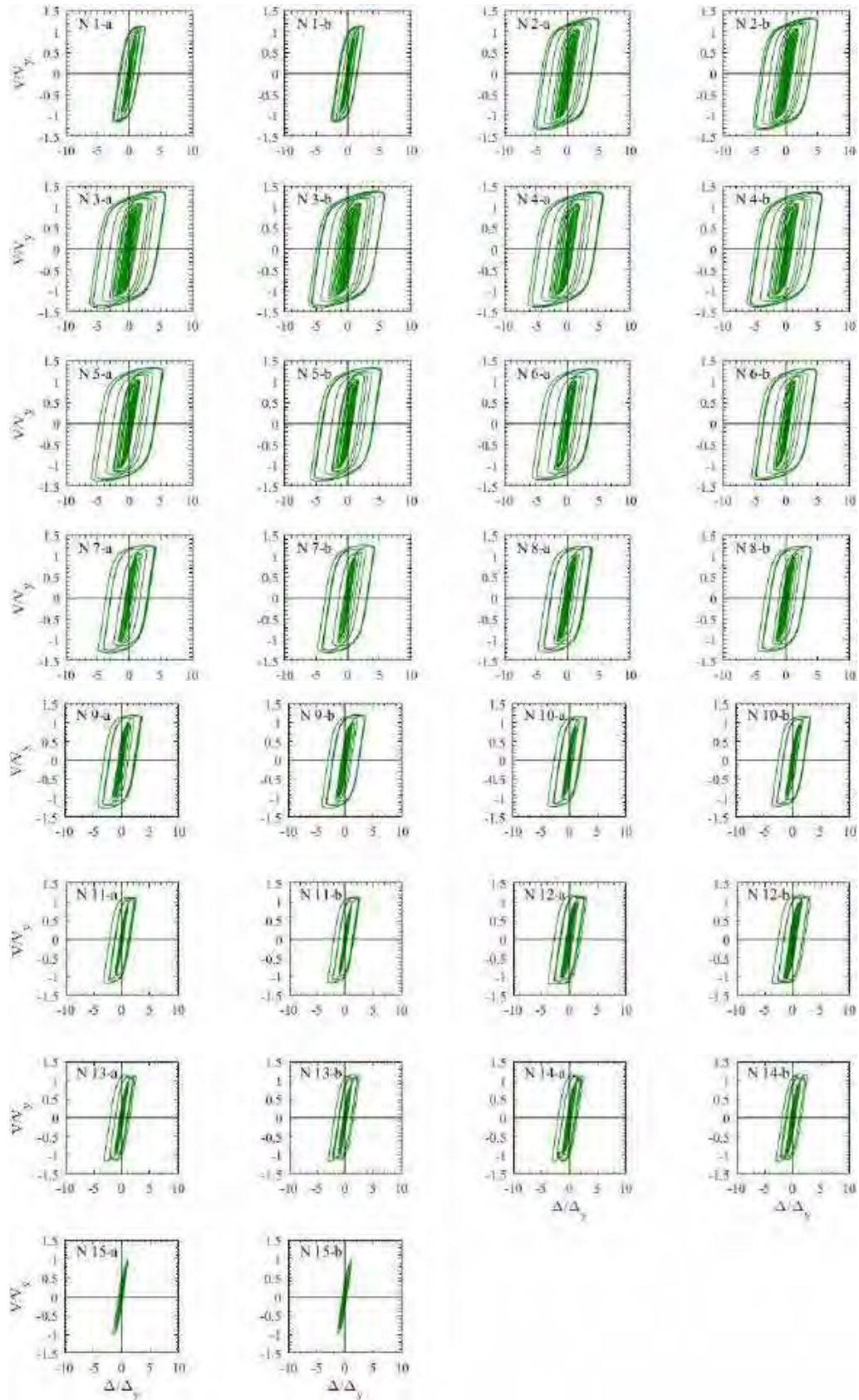


Figura G.7. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SMR-A

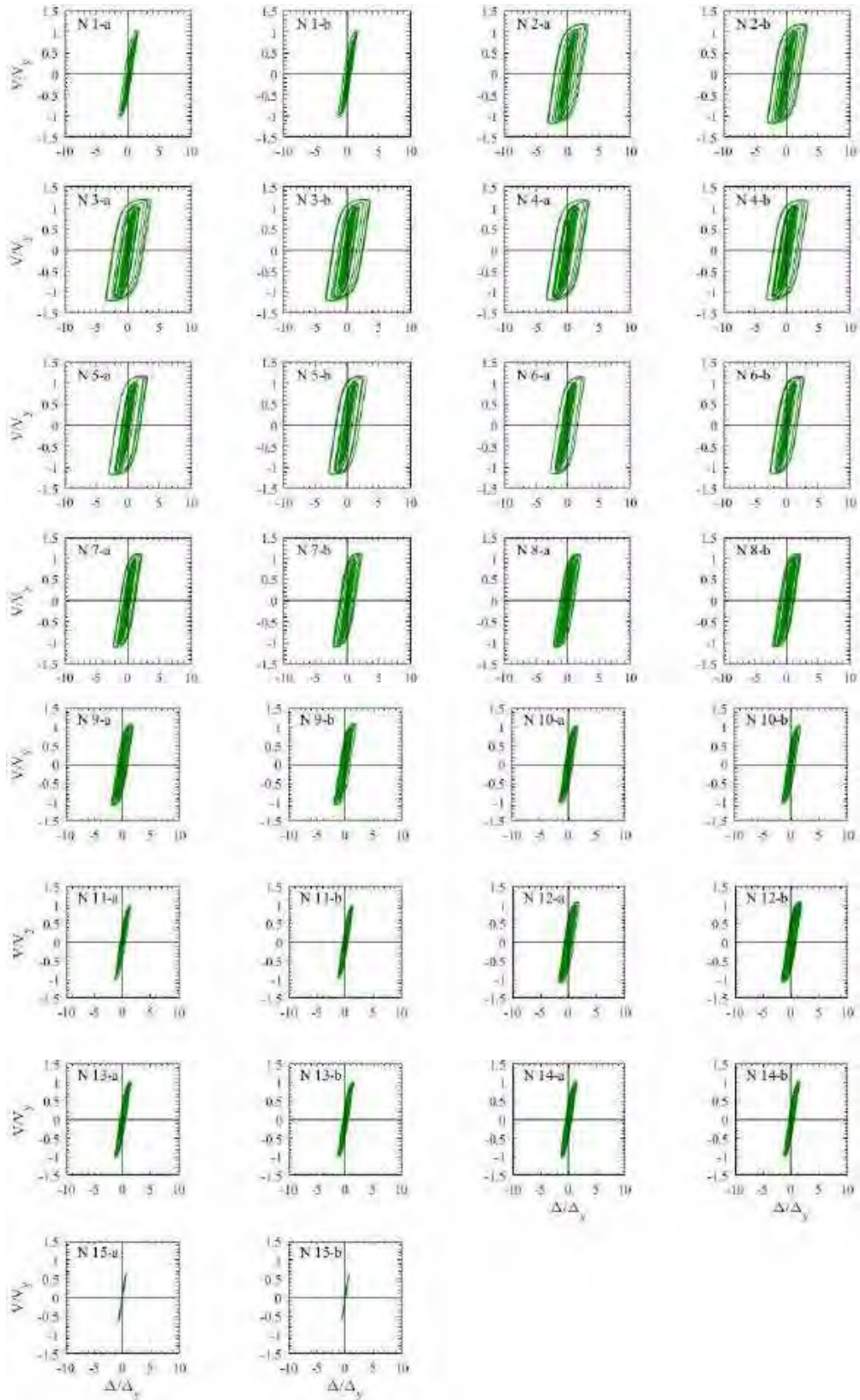


Figura G.8. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SMR –B

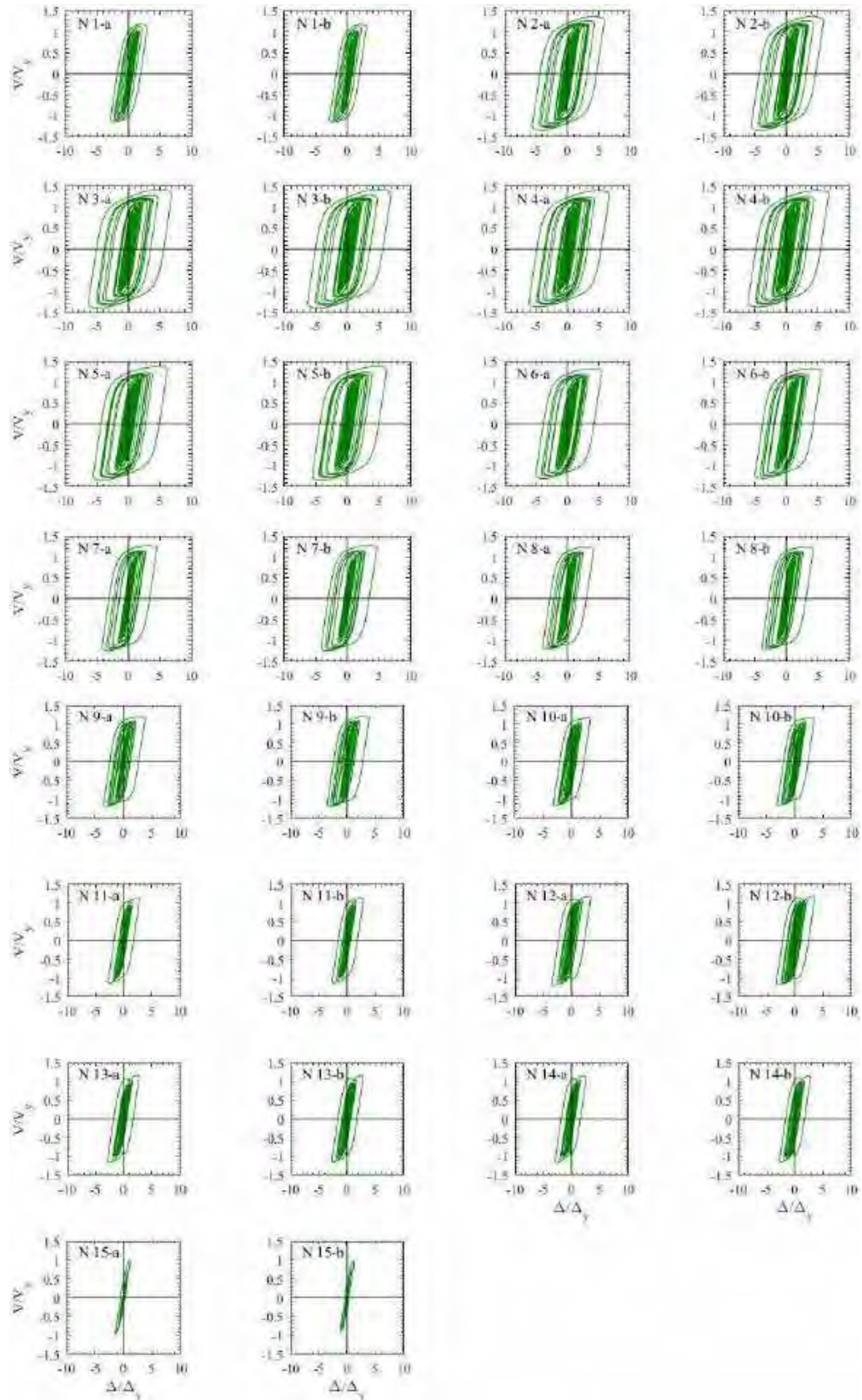


Figura G.9. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración MI15-A

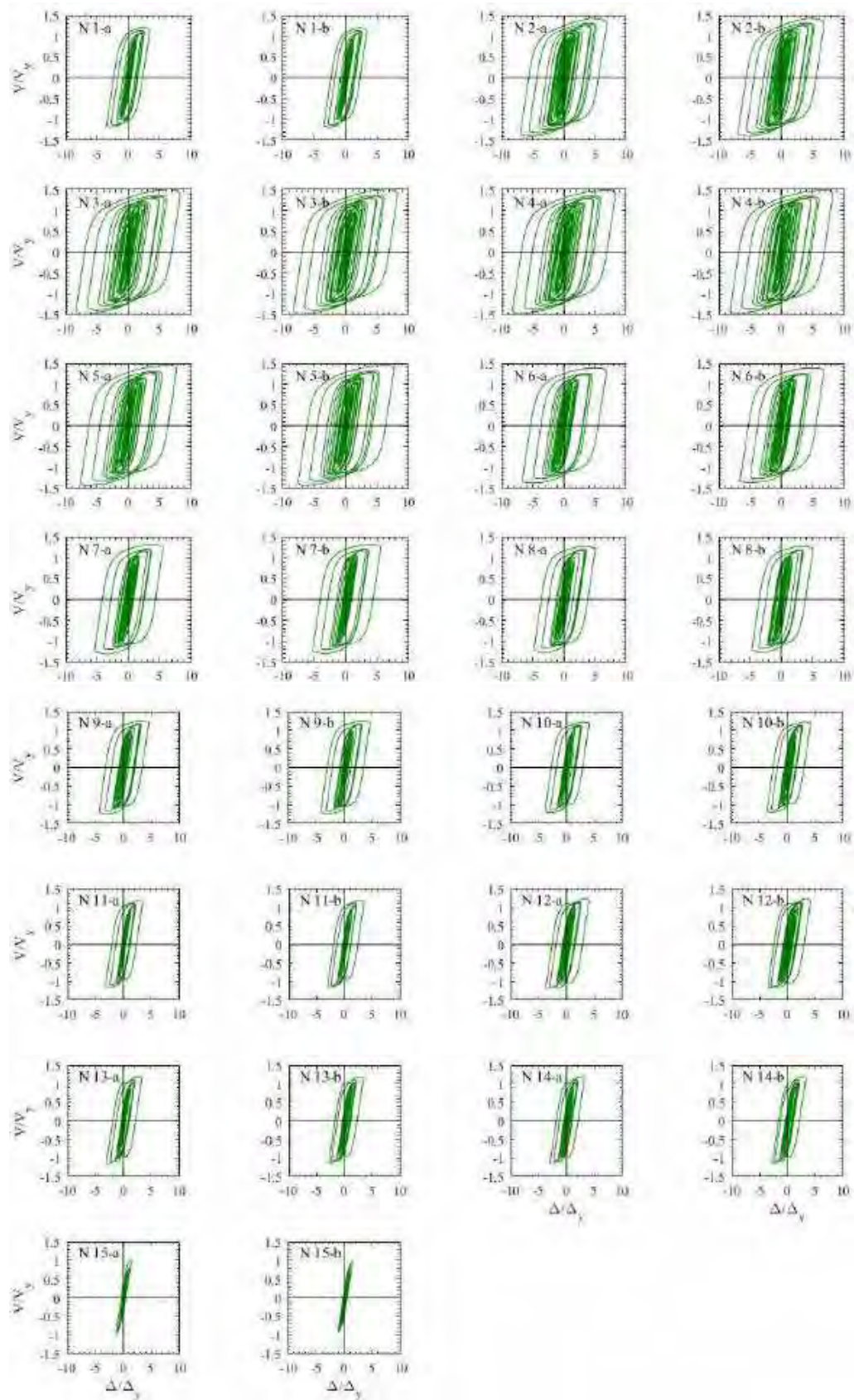


Figura G.10. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración MI15-B

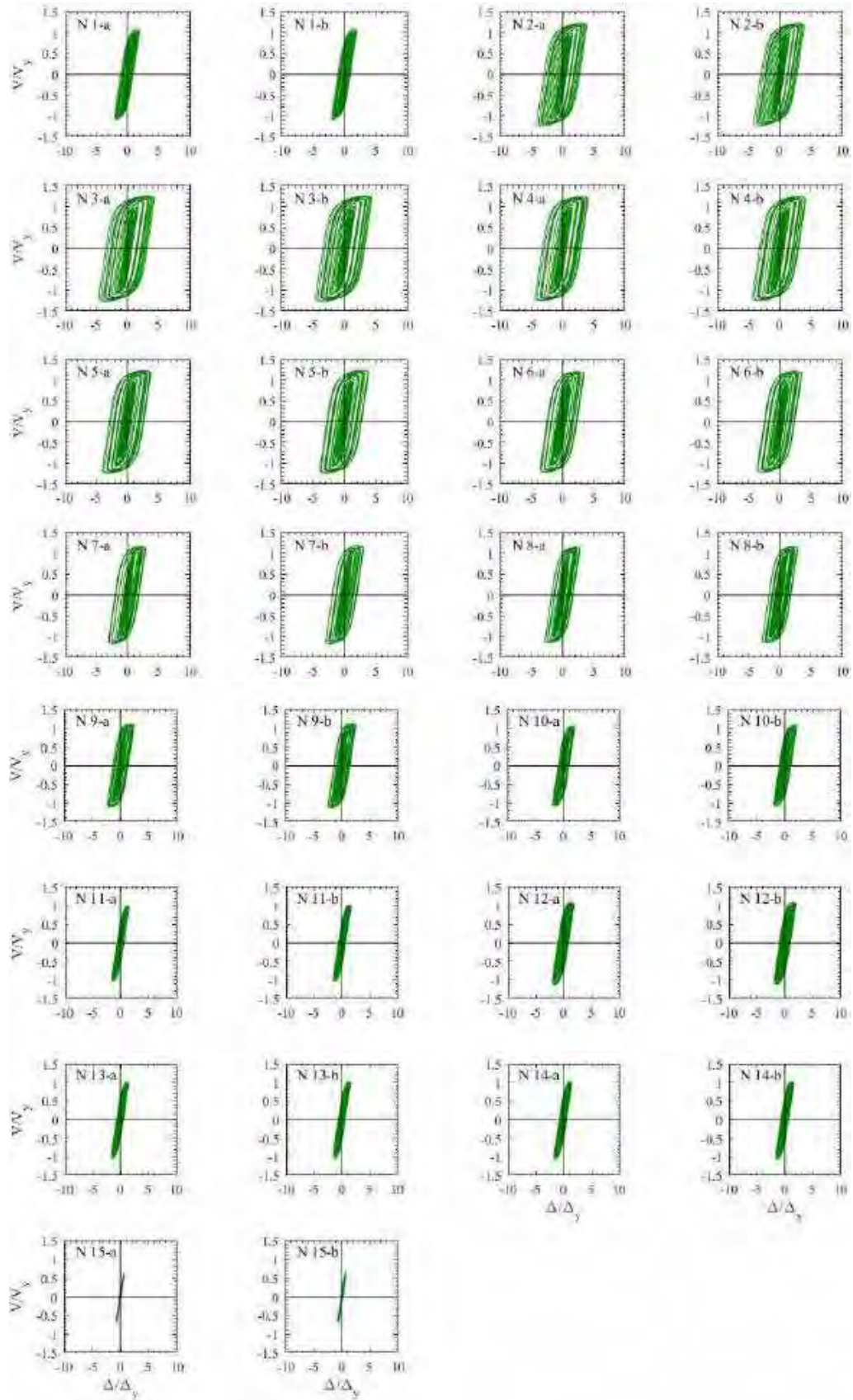


Figura G.11. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CU80-A (2017)

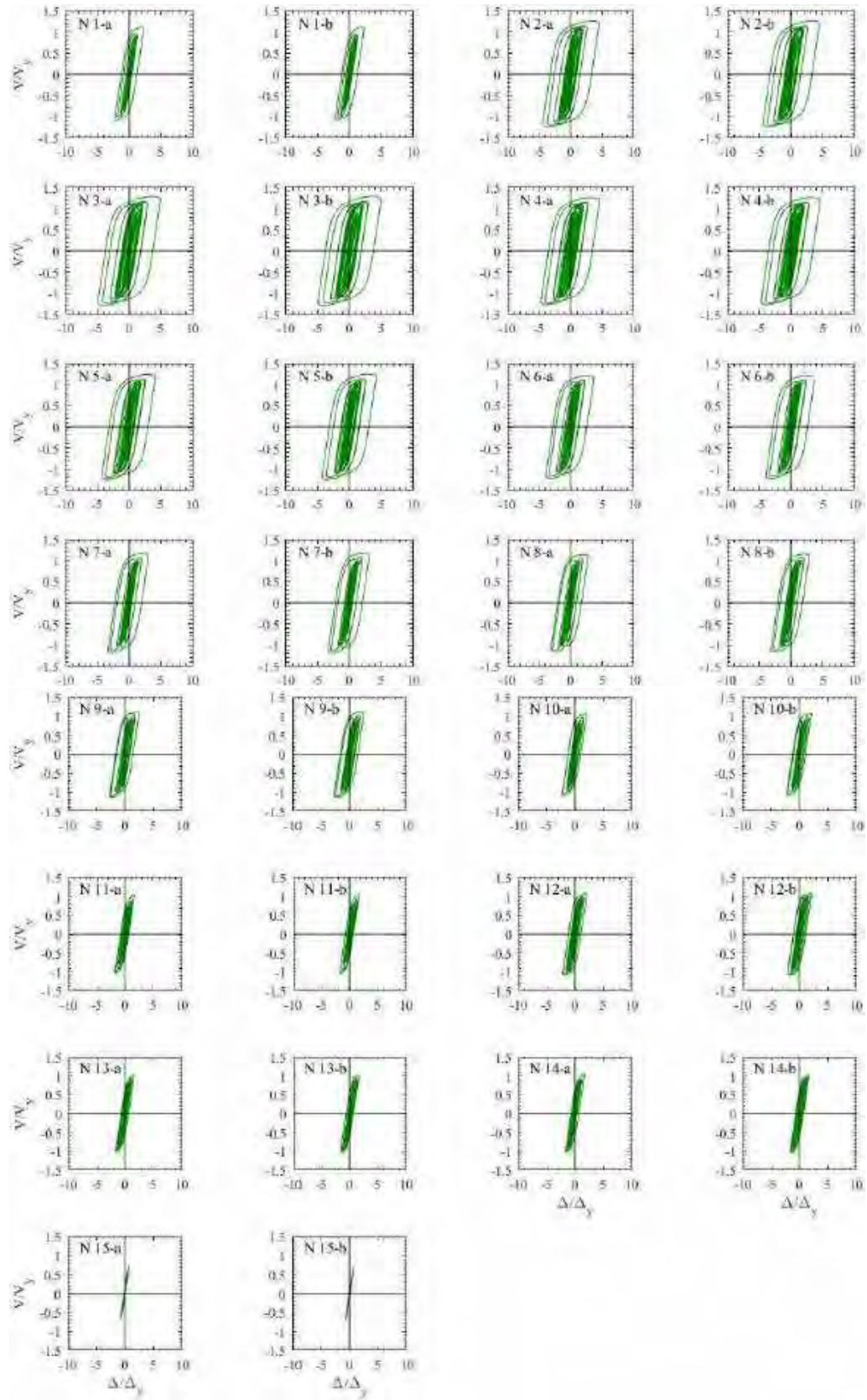


Figura G.12. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CU80-B (2017)

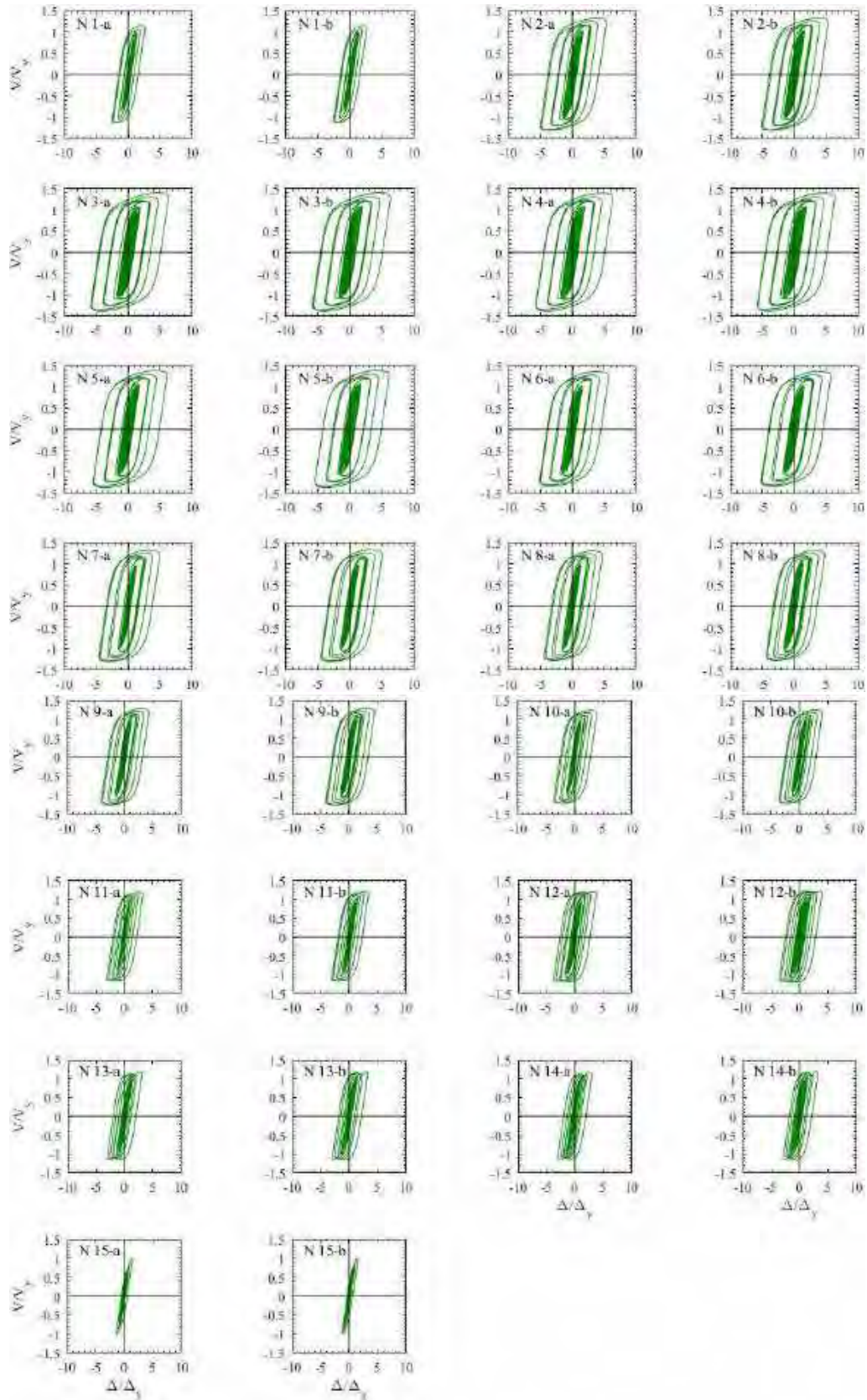


Figura G.13. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DX37-A (2017)

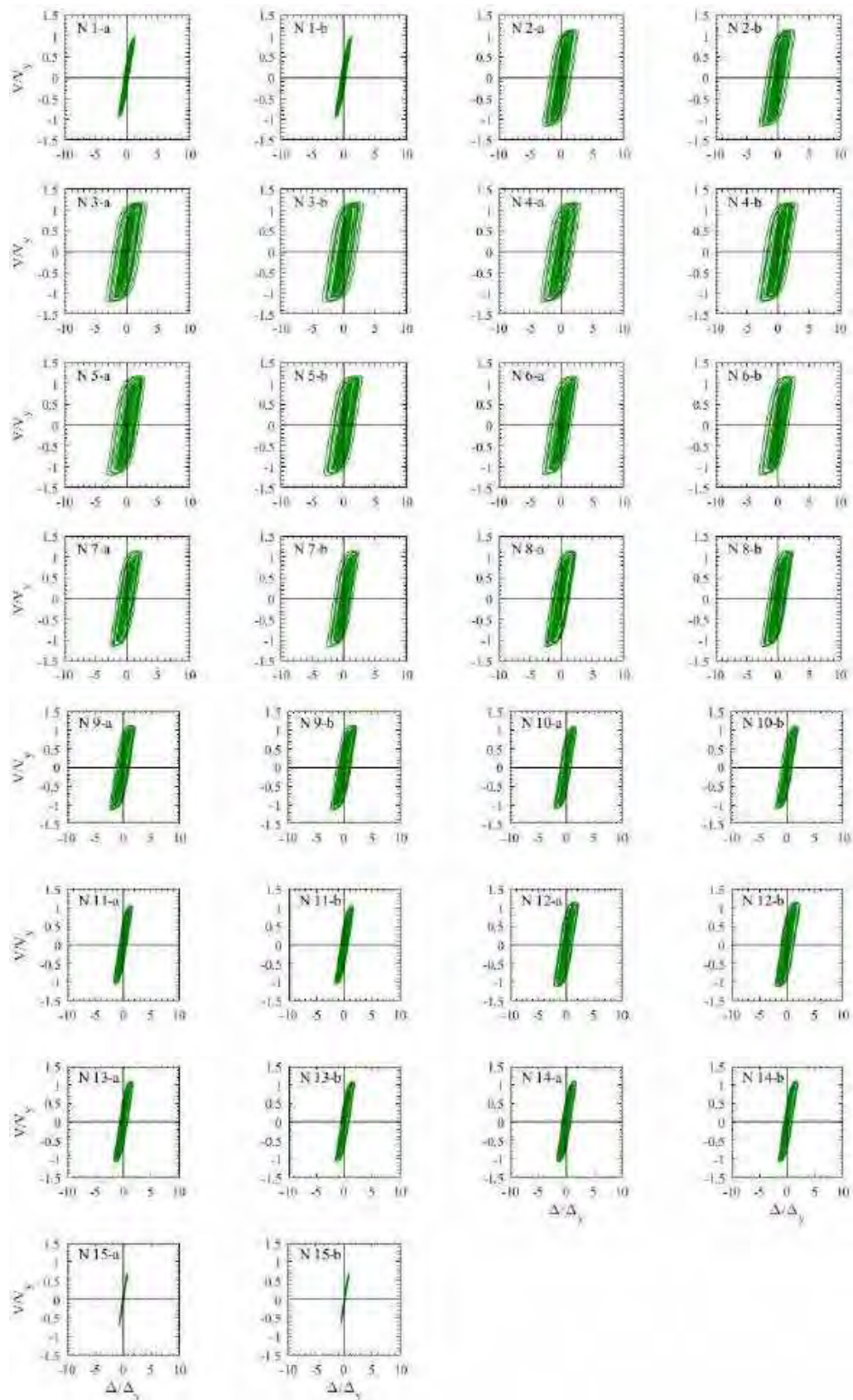


Figura G.14. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DX37-B (2017)

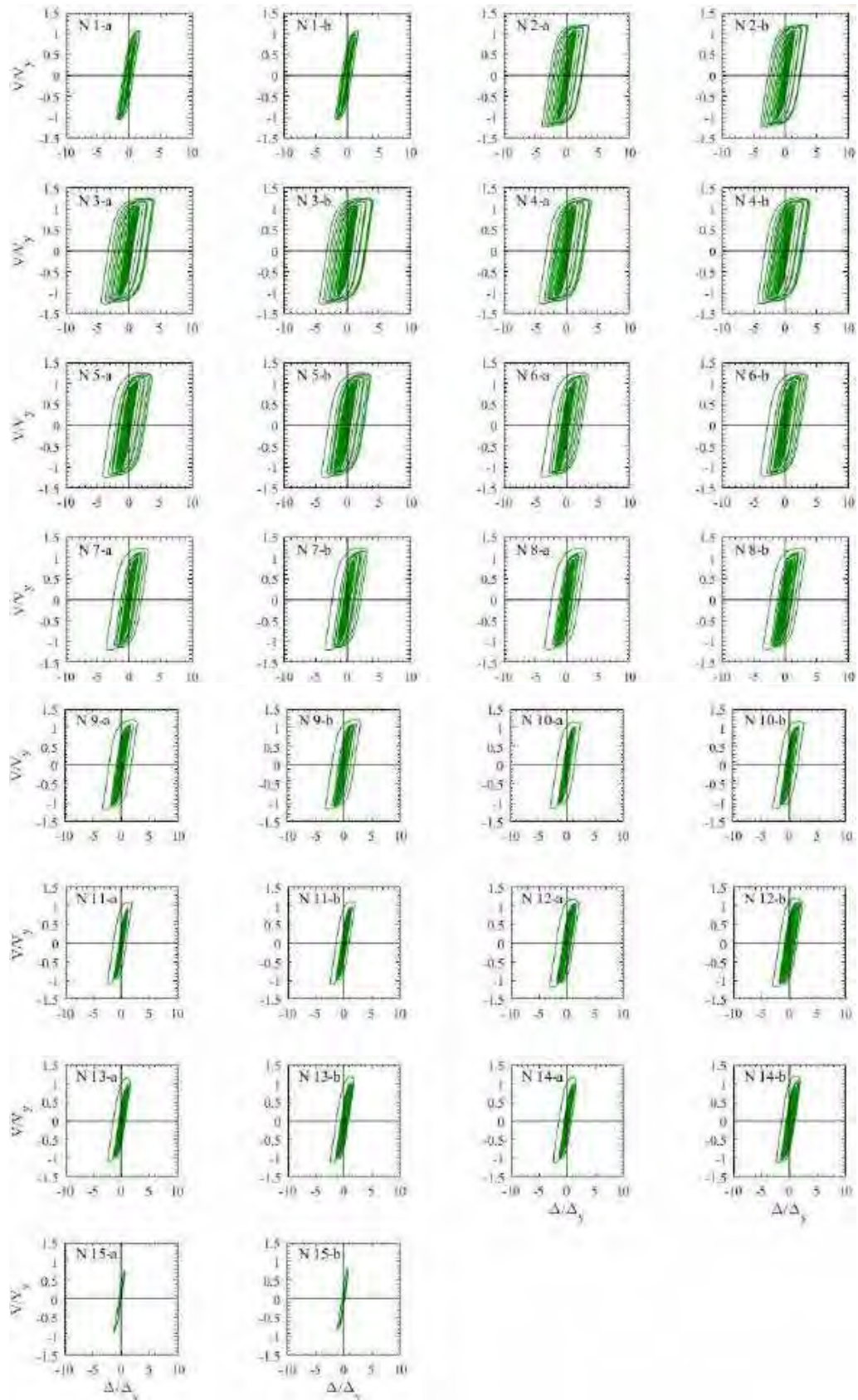


Figura G.15. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración JC54-A (2017)

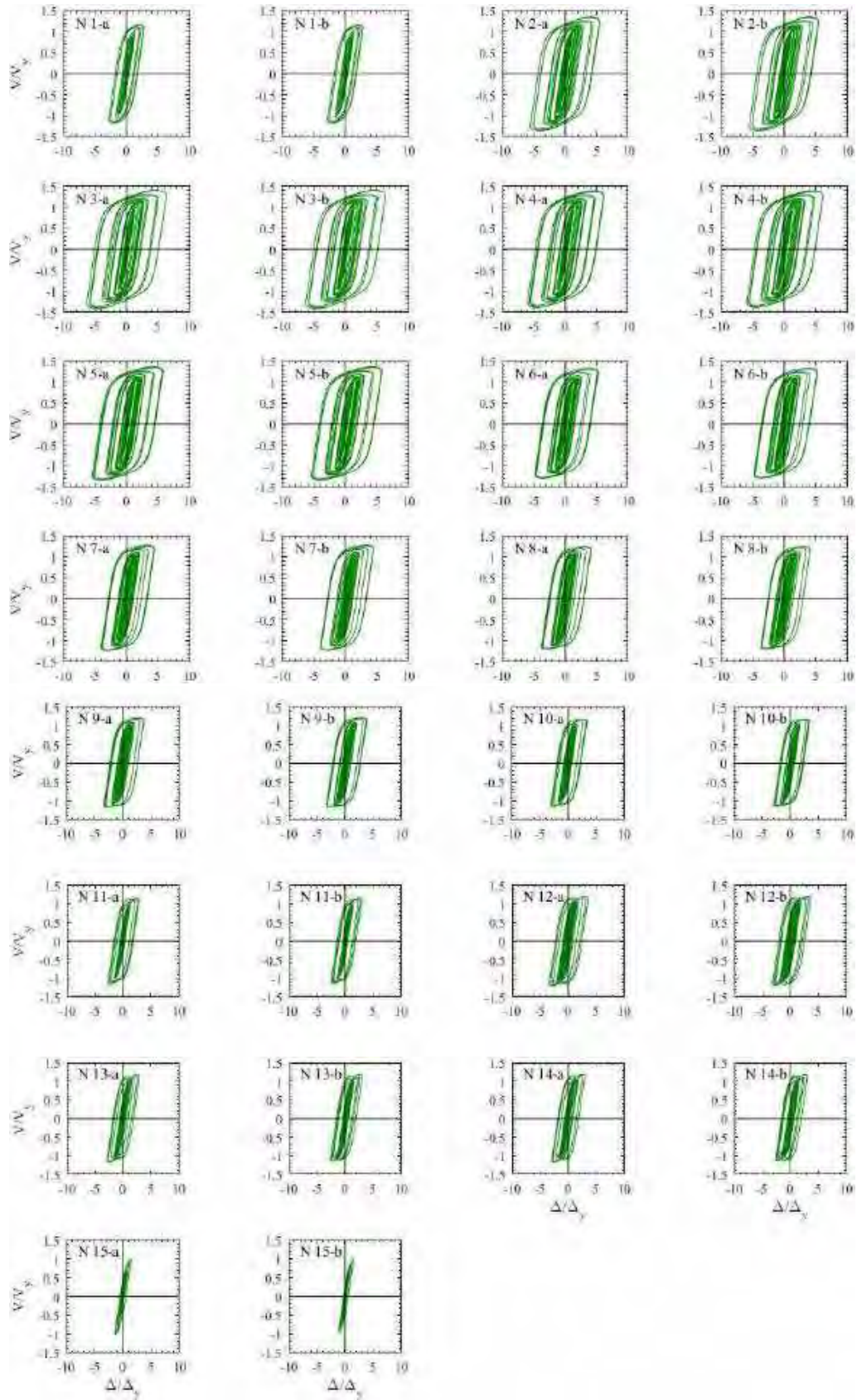
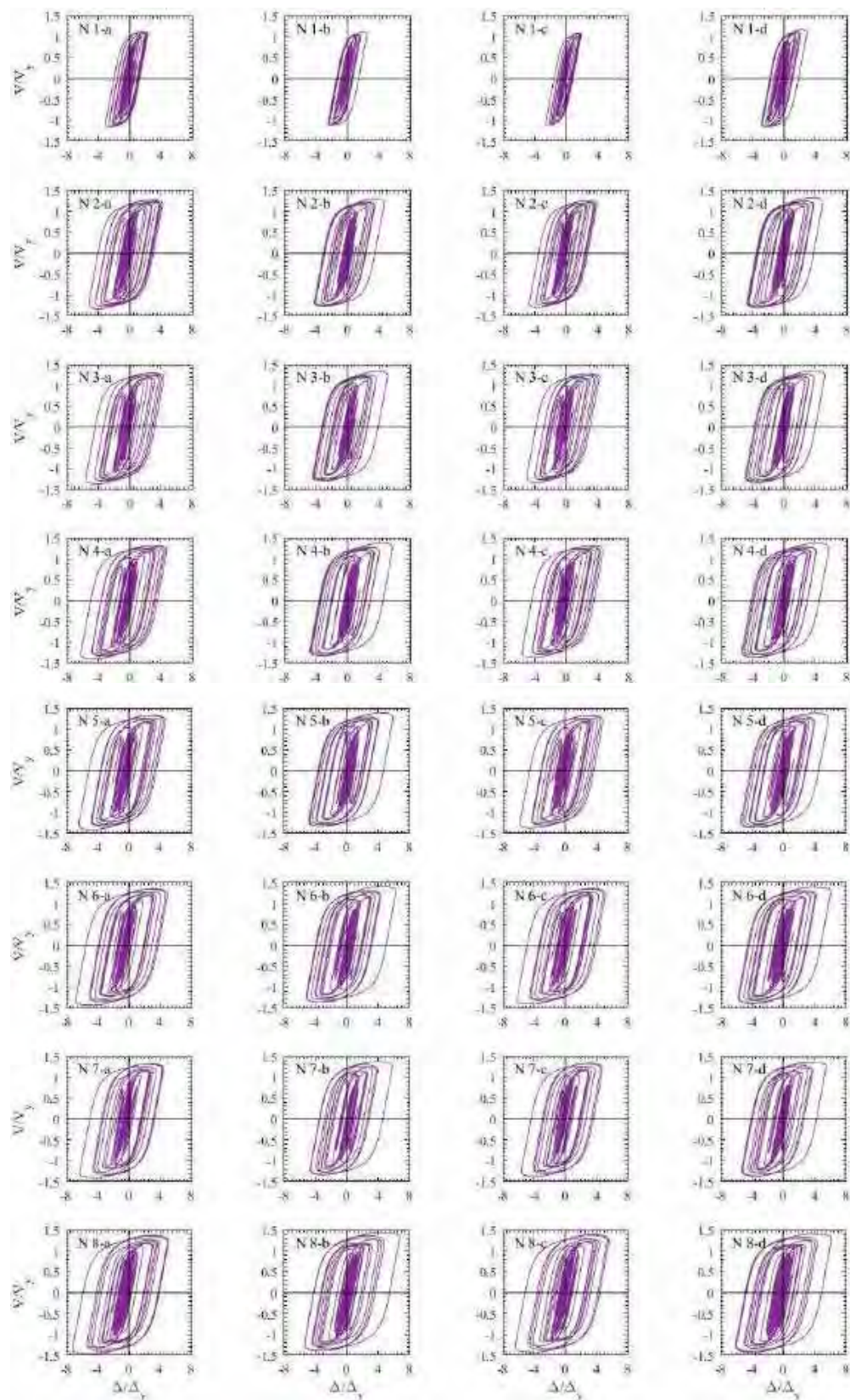


Figura G.16. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.1.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB



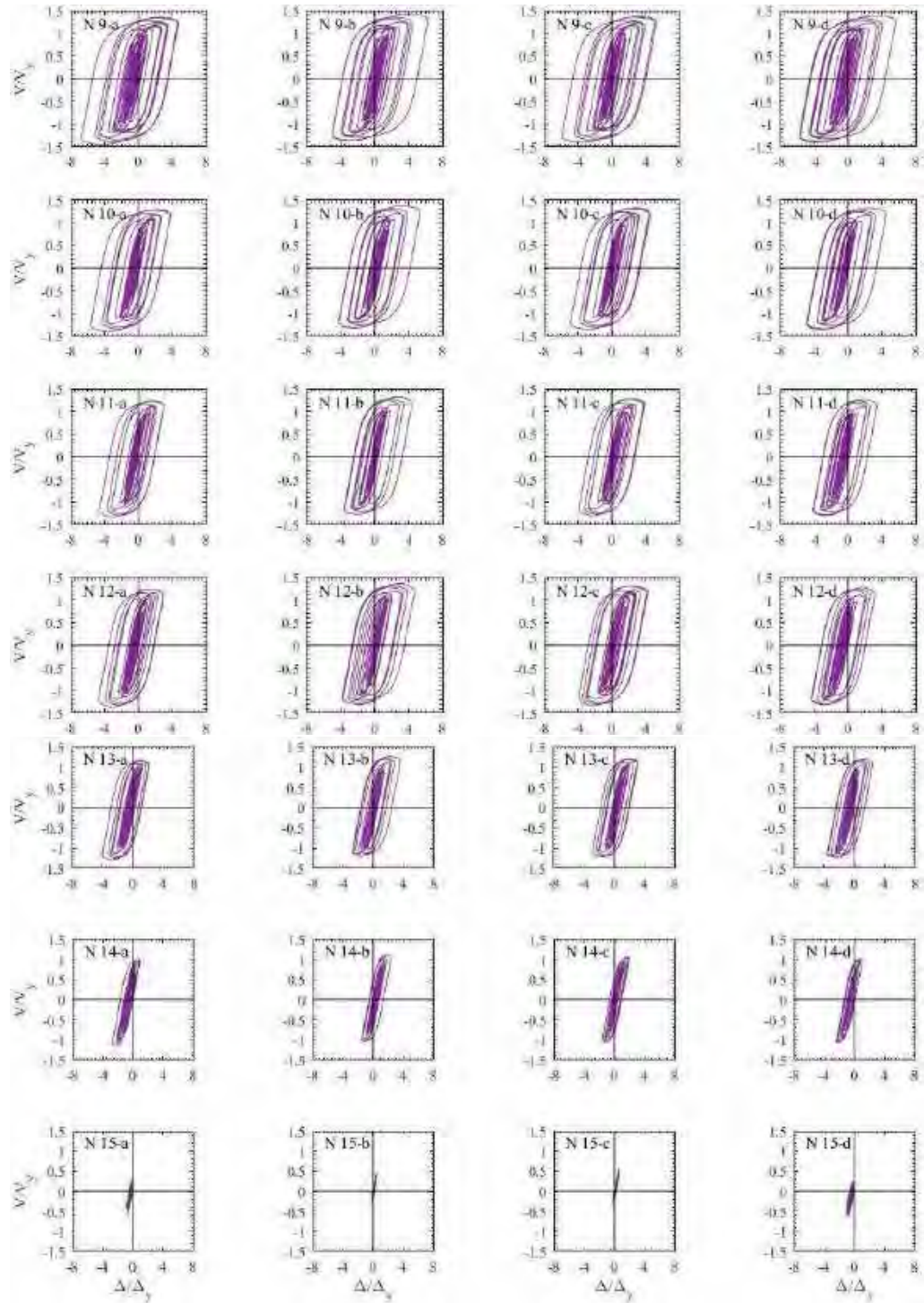
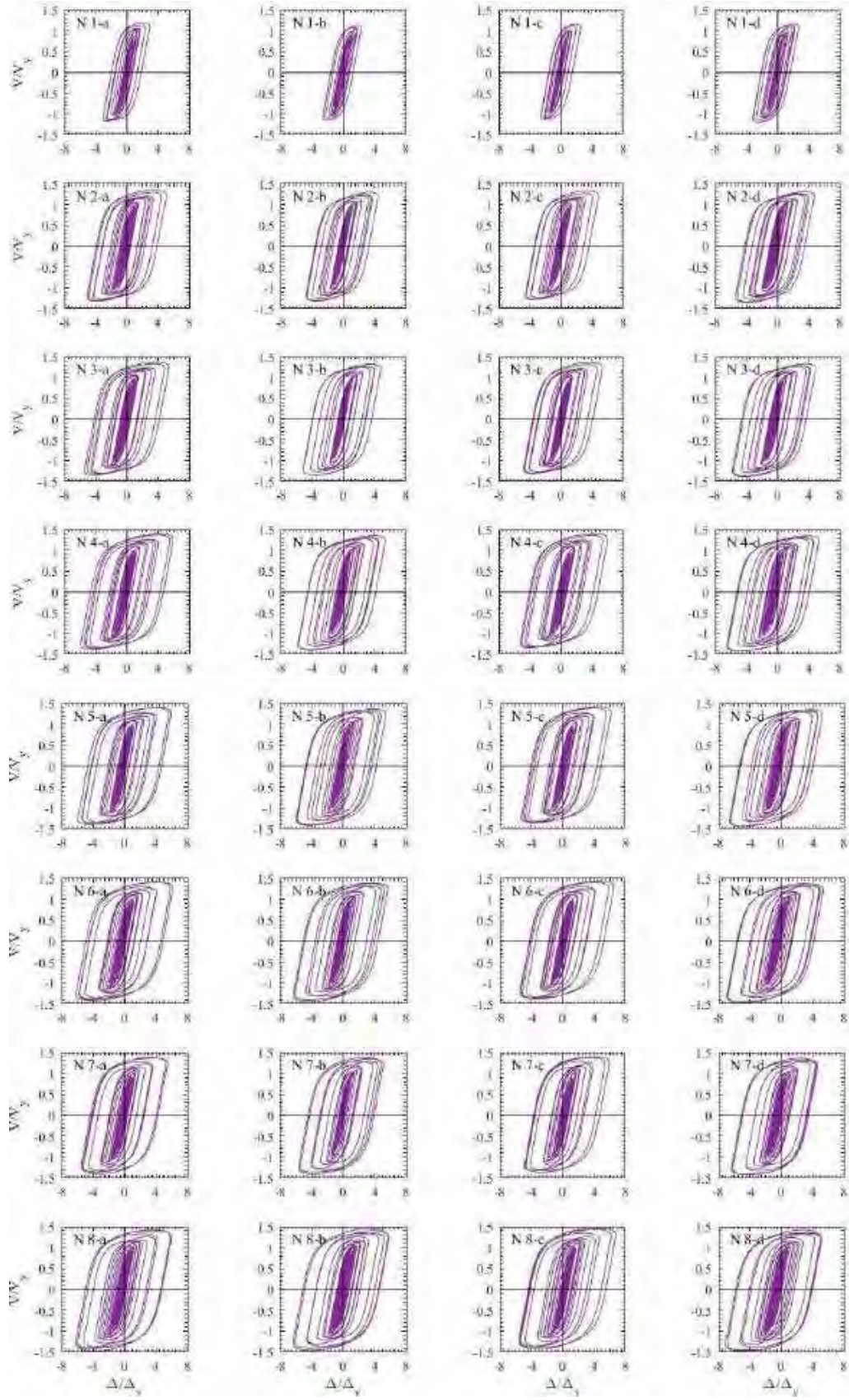


Figura G.17. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CM-A



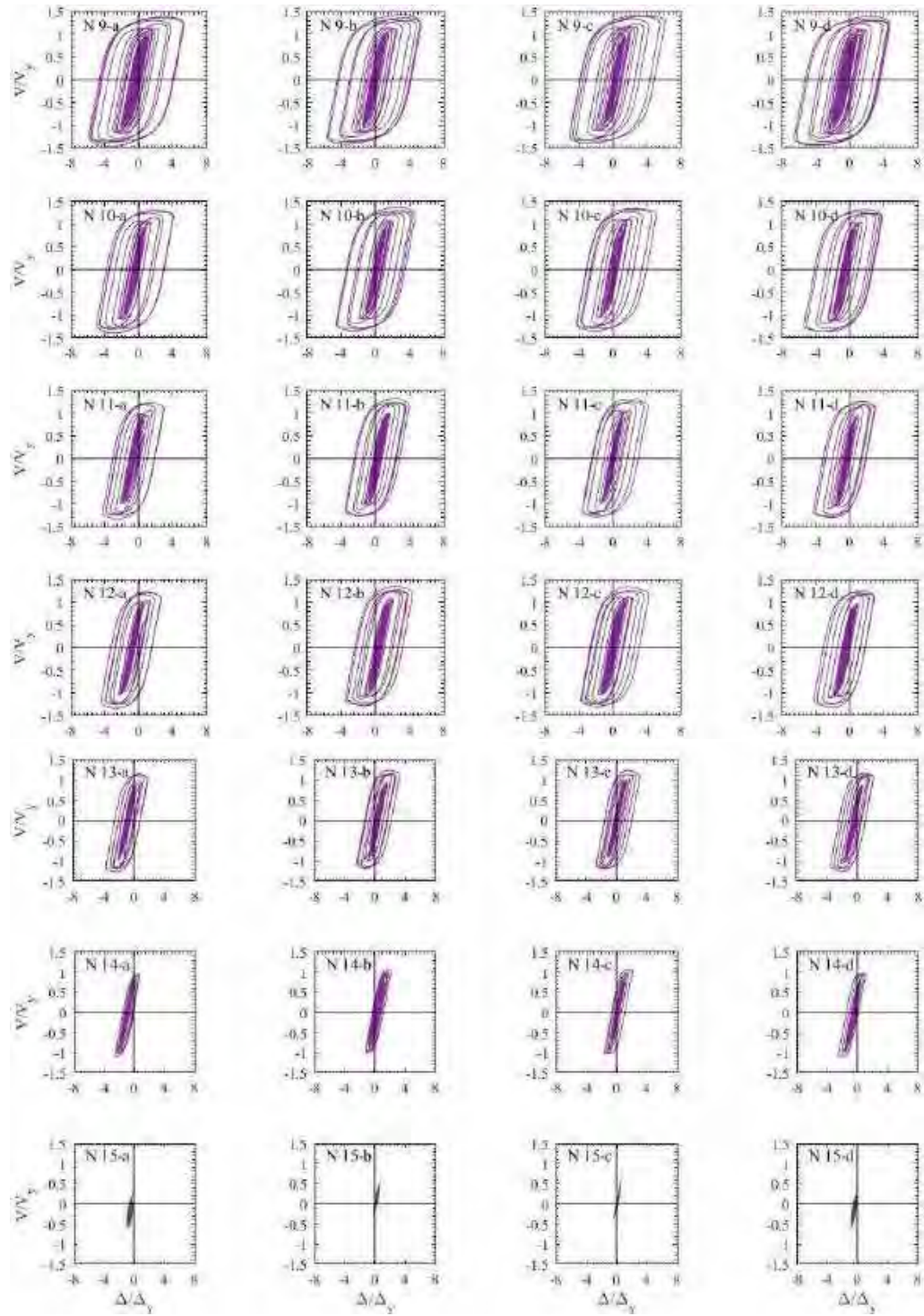
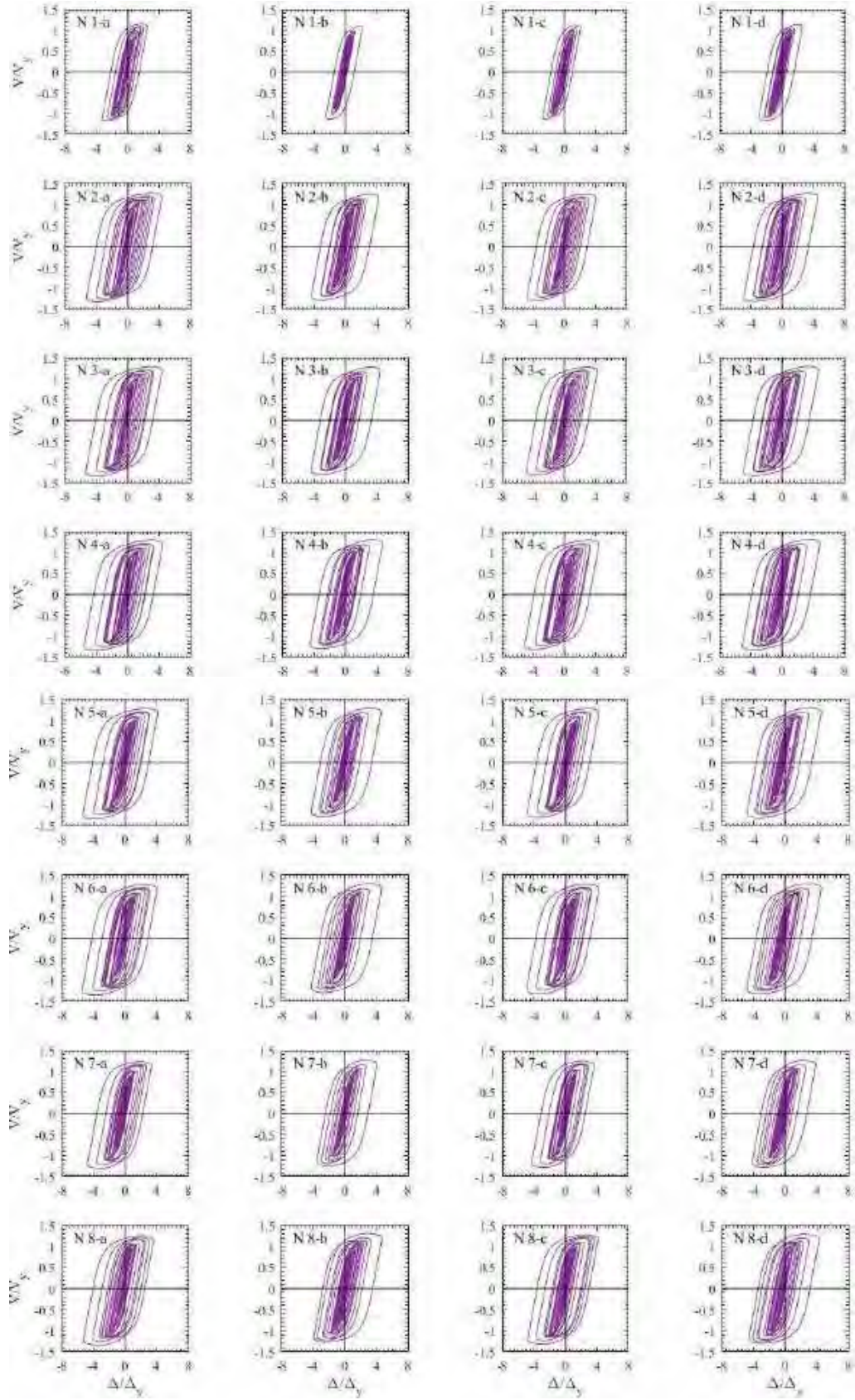


Figura G.18. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CM-B



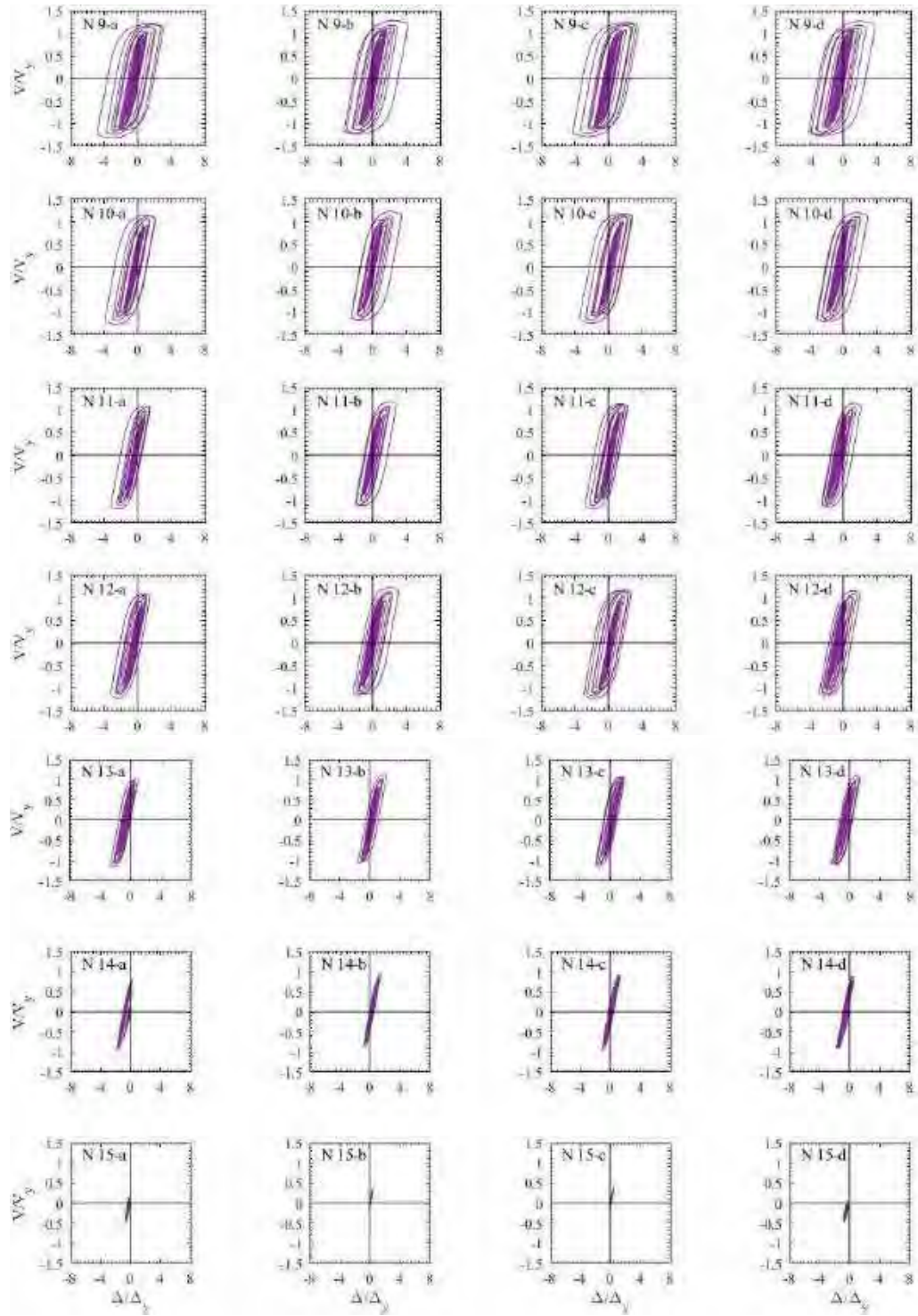
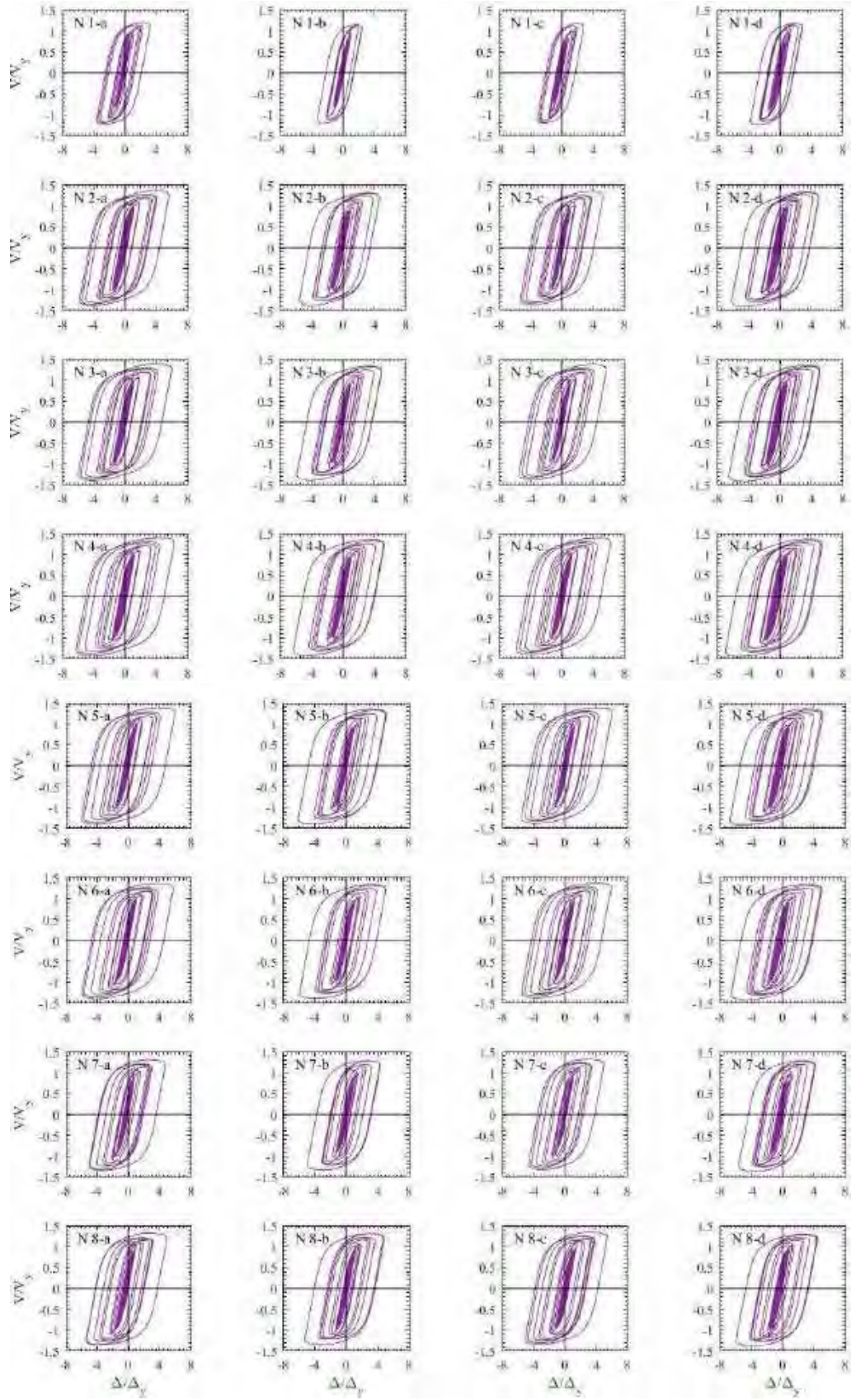


Figura G.19. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DFRO-A



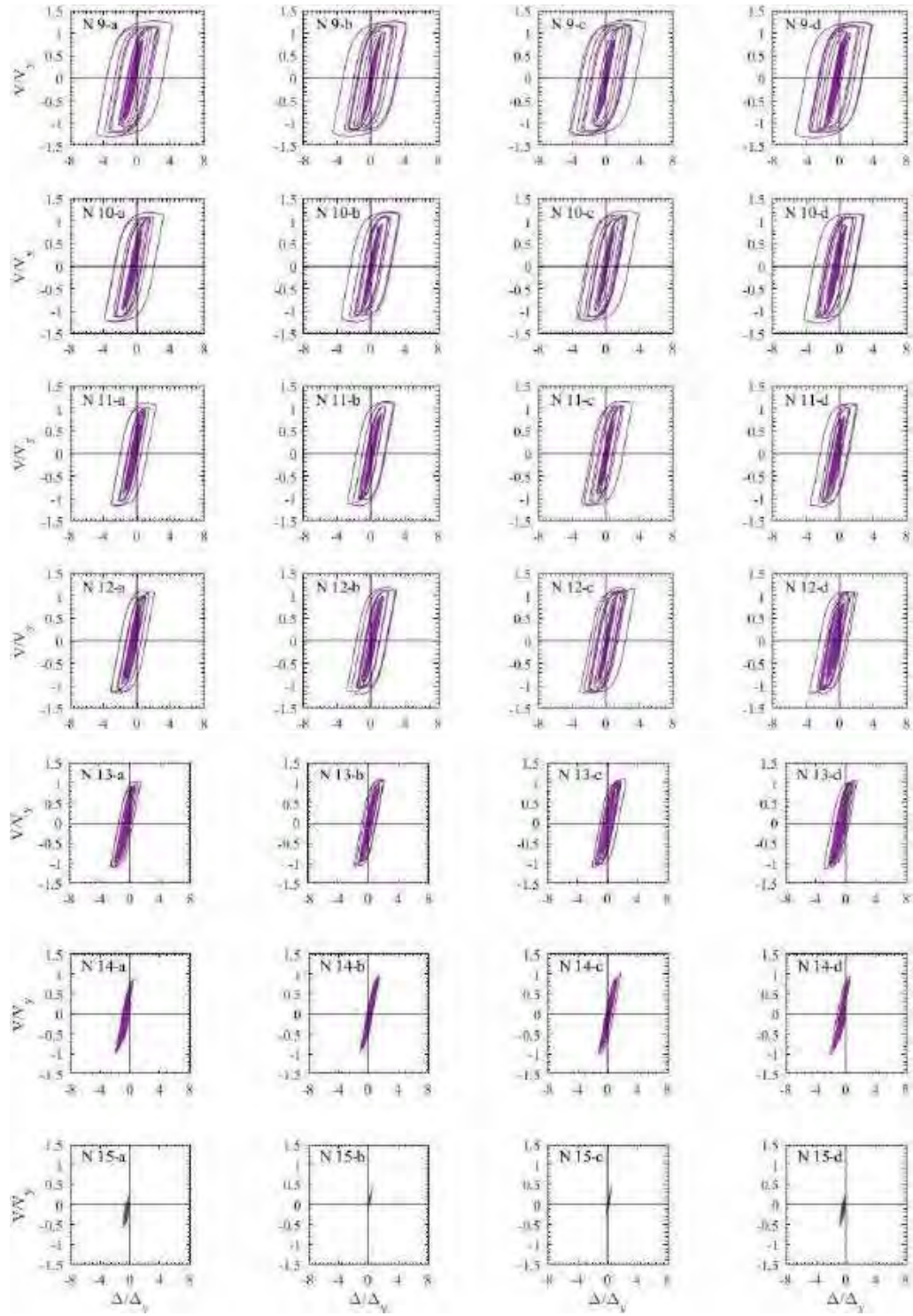
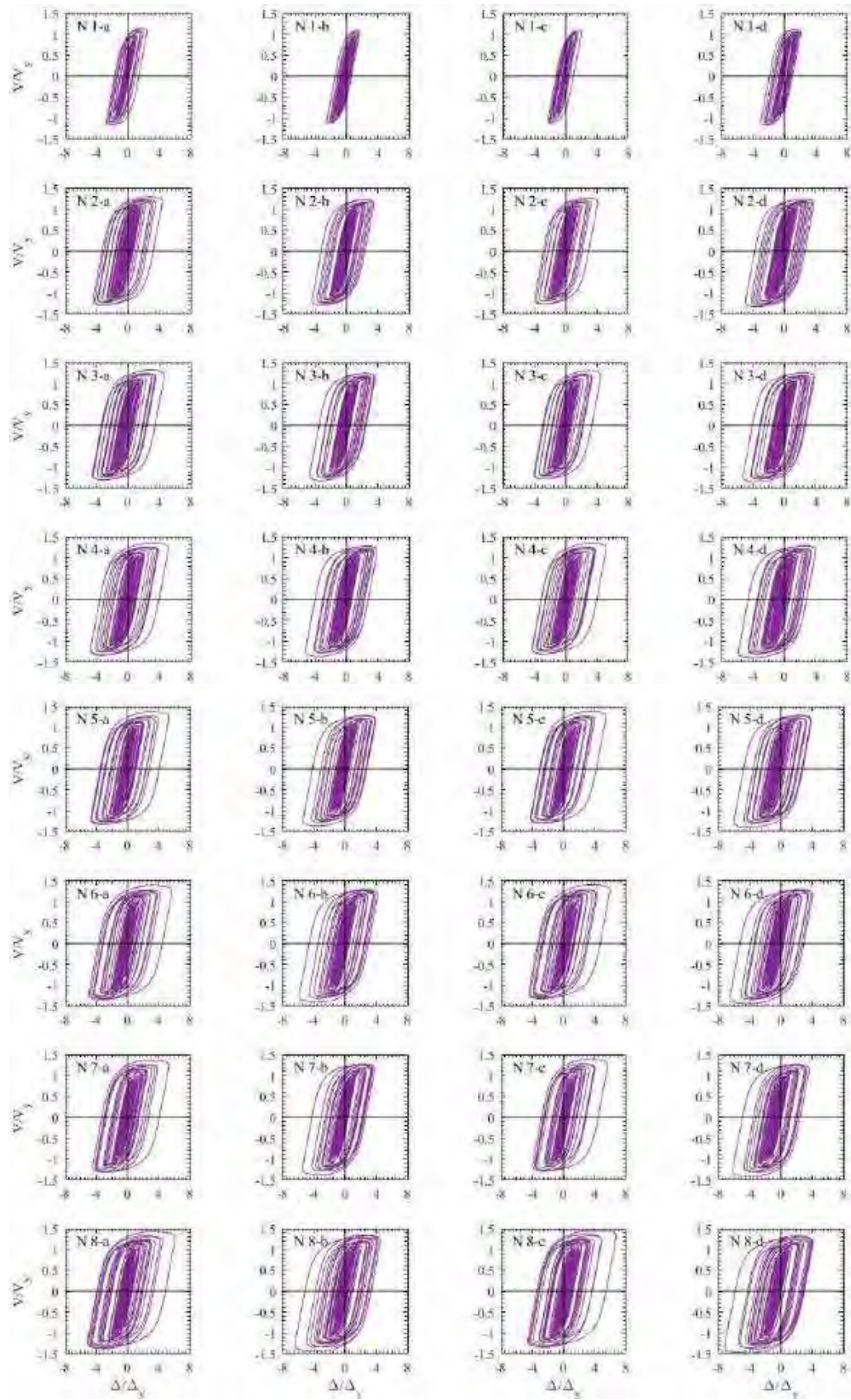


Figura G.20. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DFRO –B



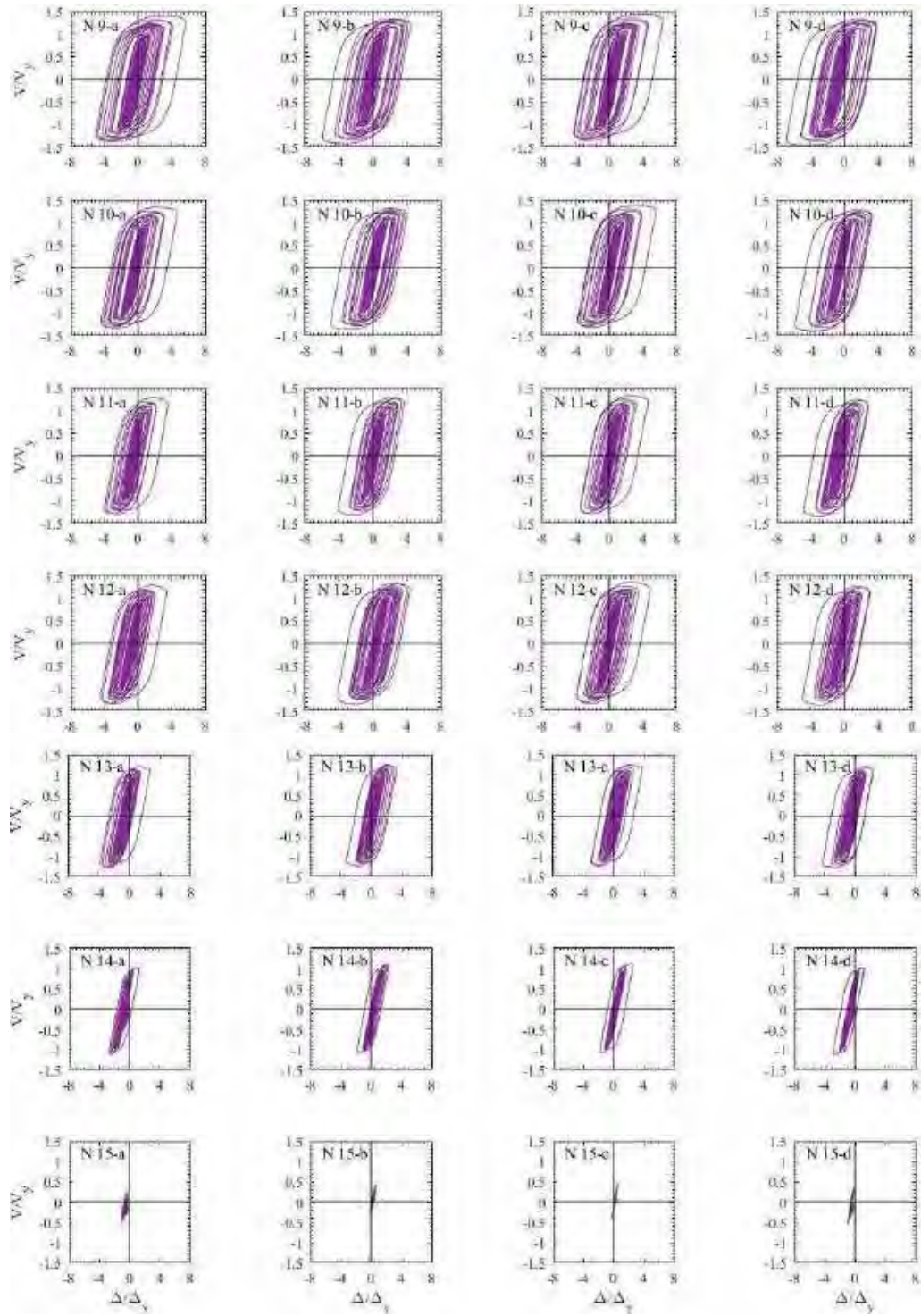
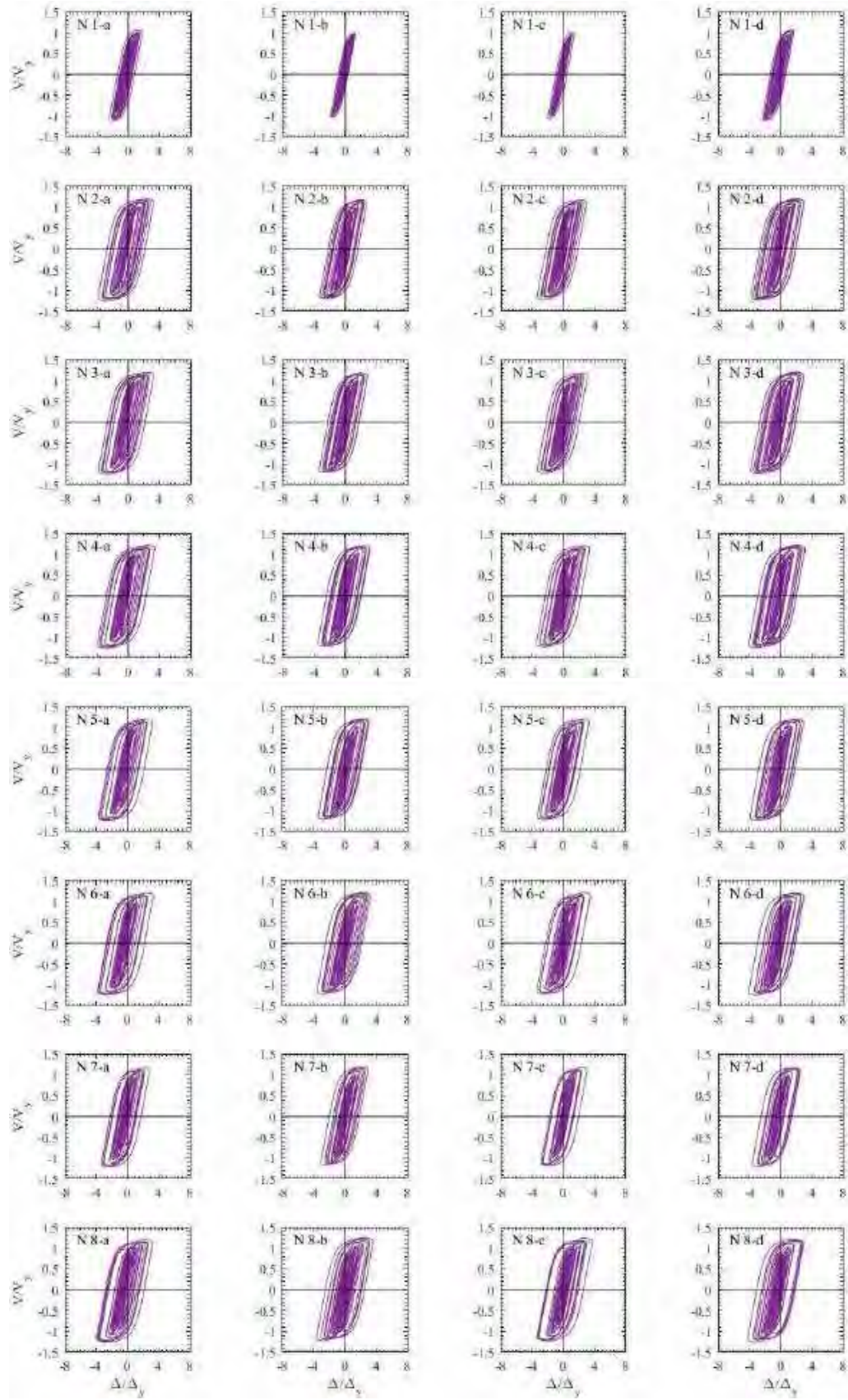


Figura G.21. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración IMSR-A



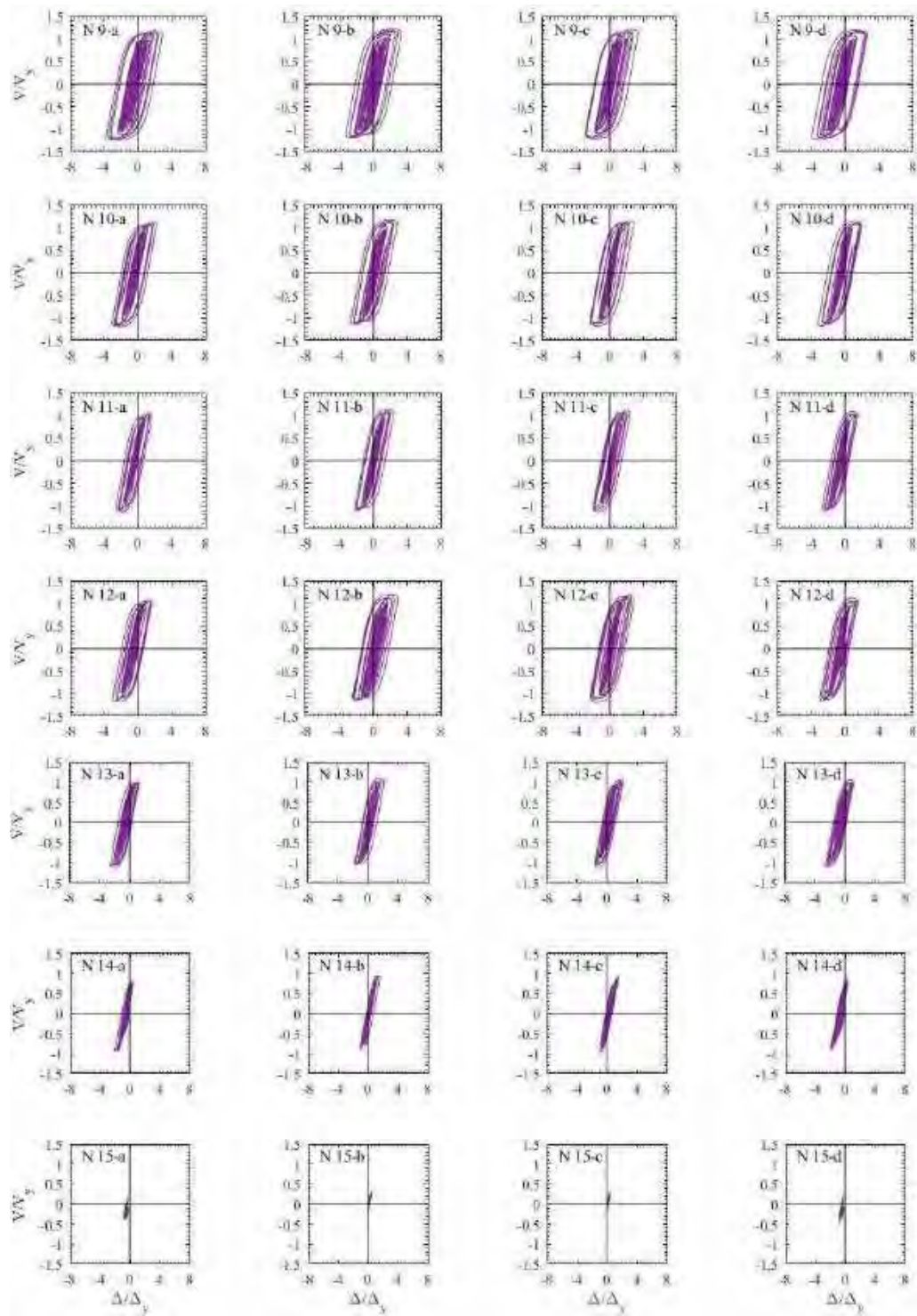
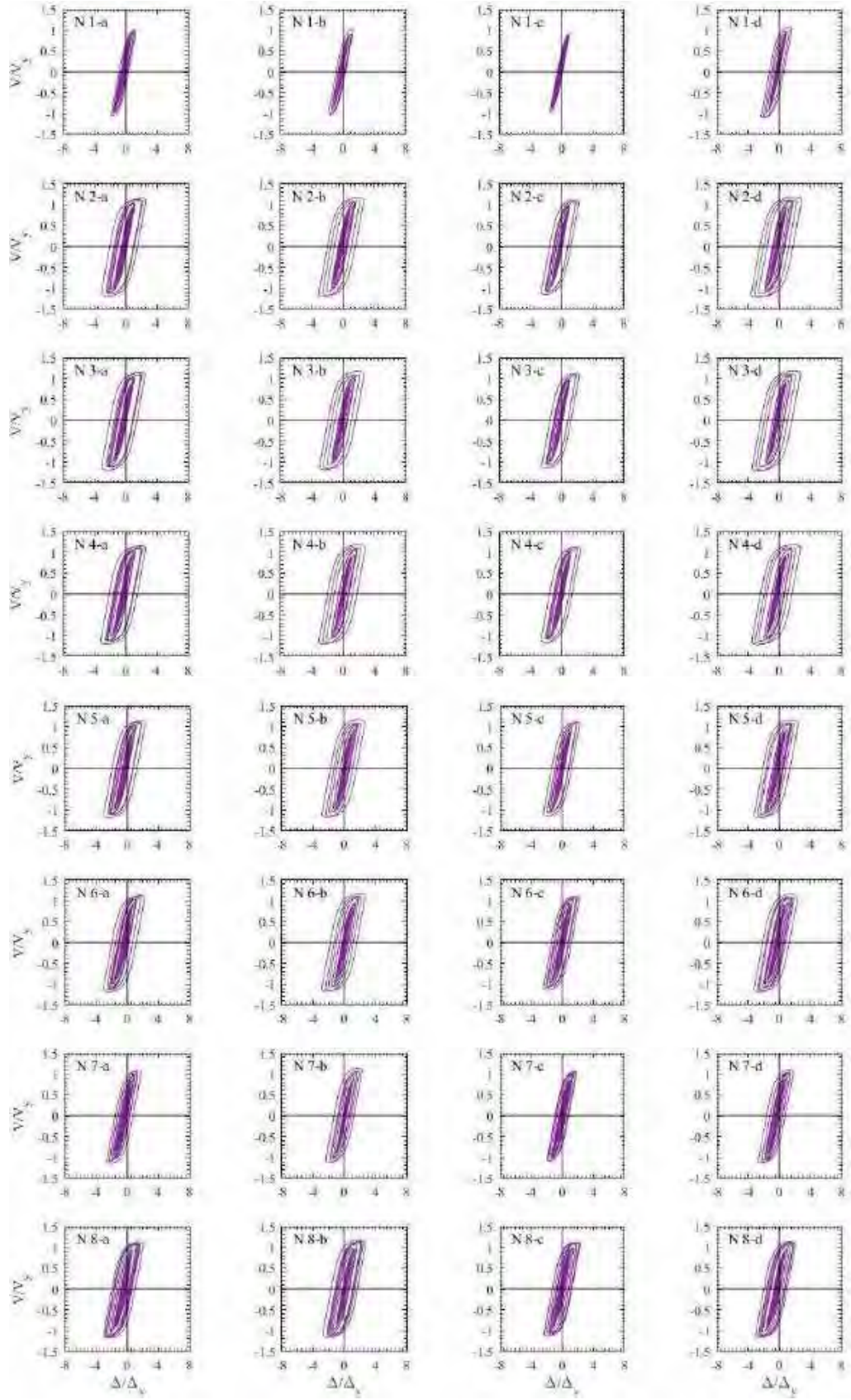


Figura G.22. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración IMSR –B



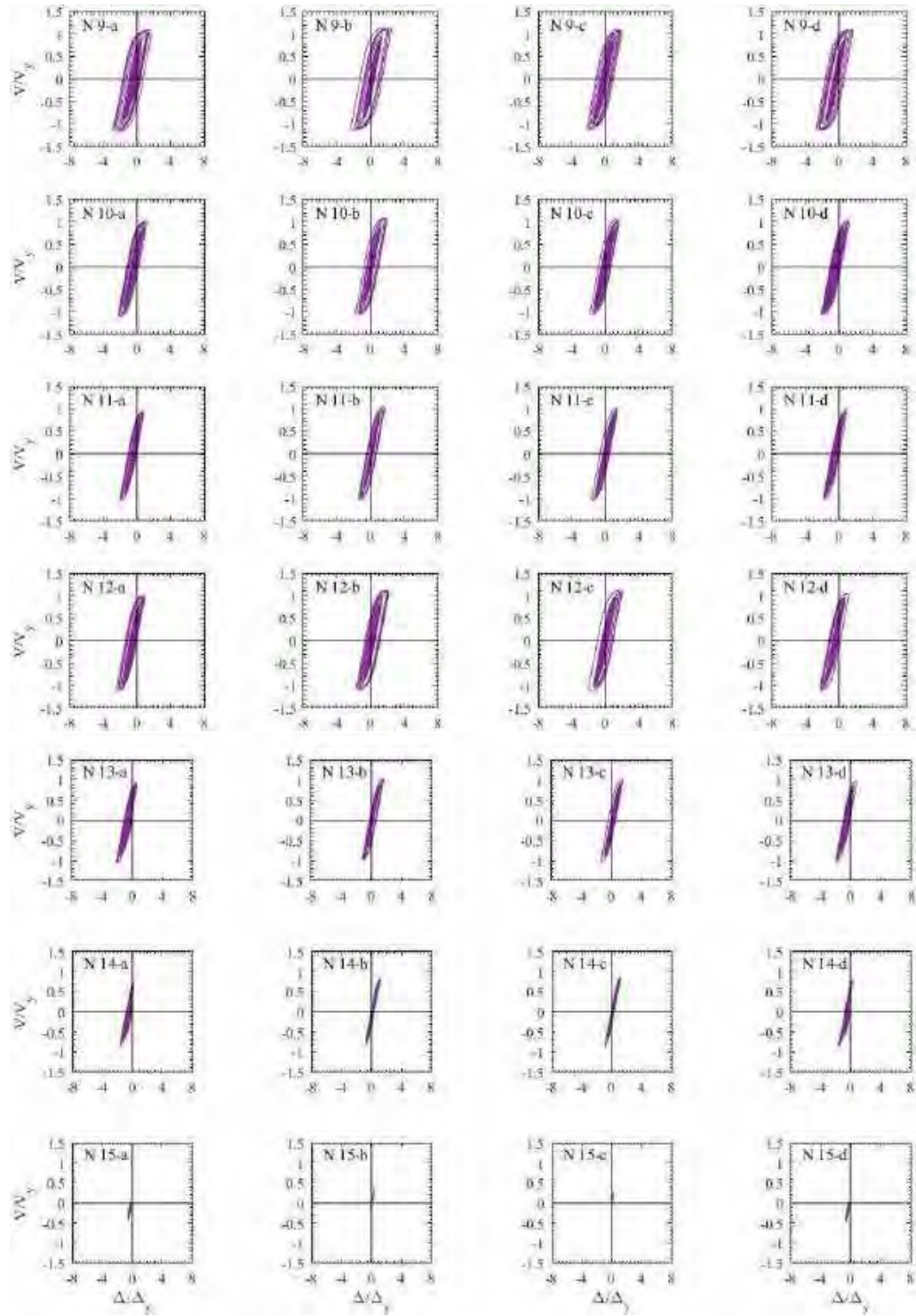
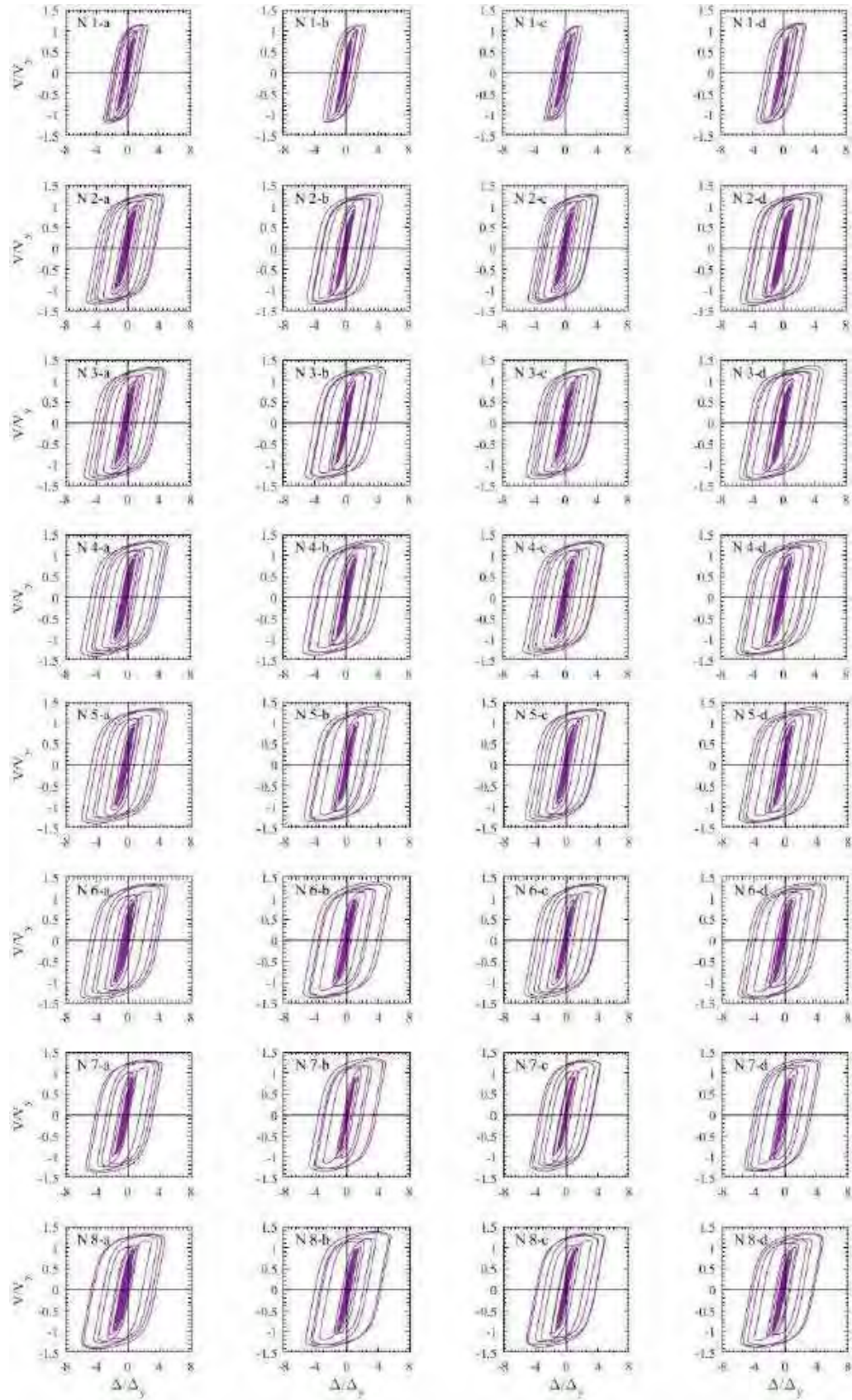


Figura G.23. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SMR-A



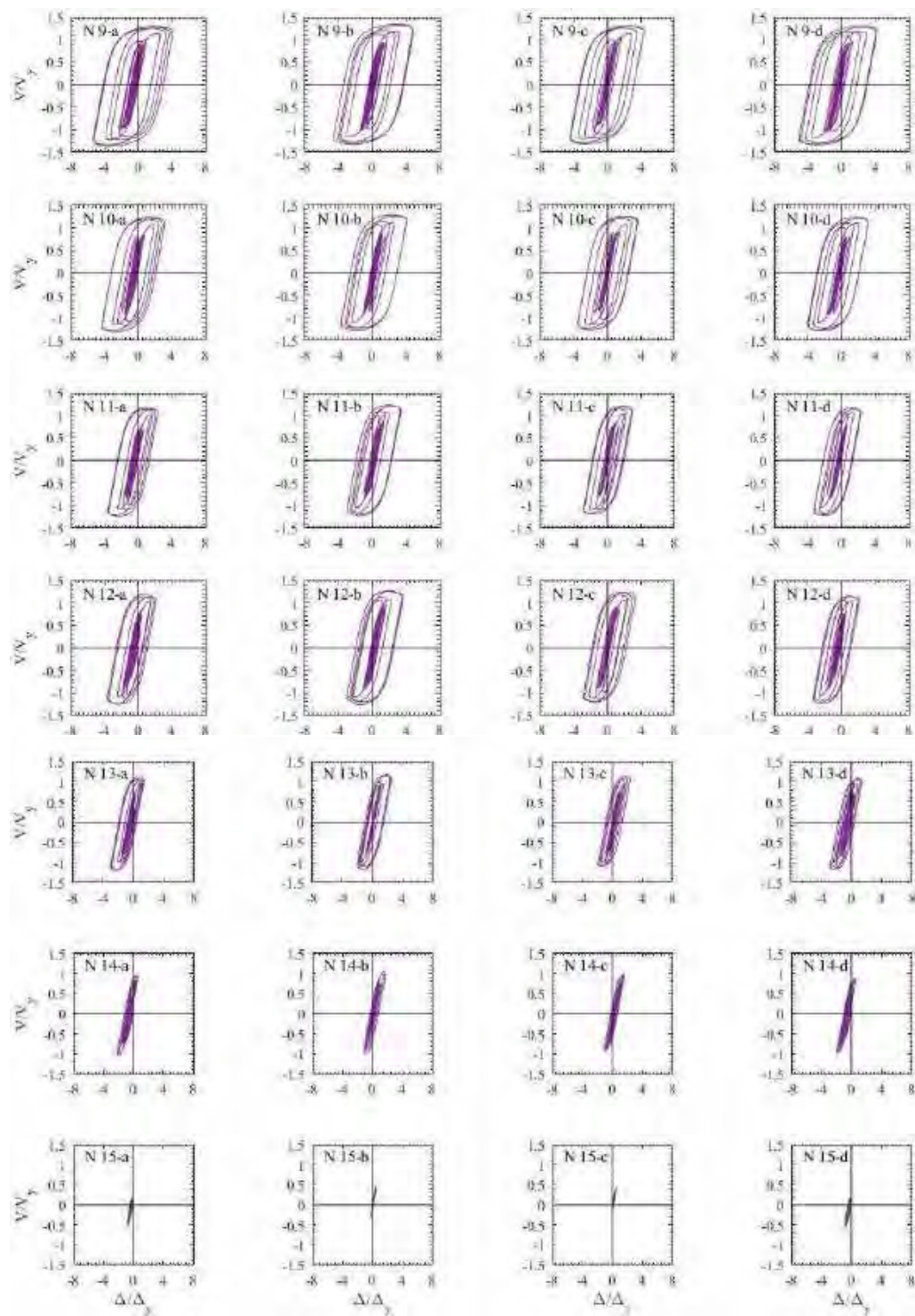
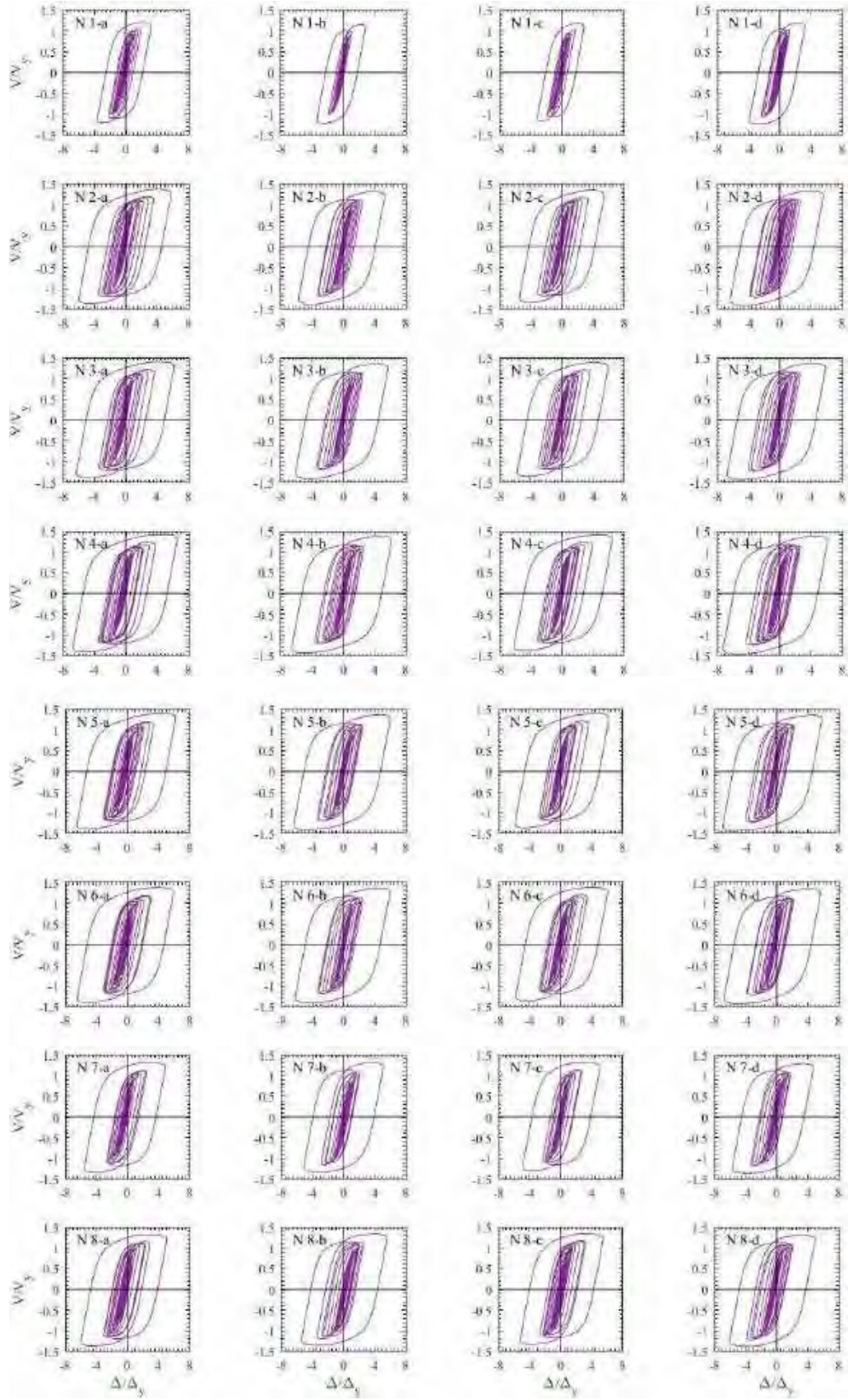


Figura G.24. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SMR –B



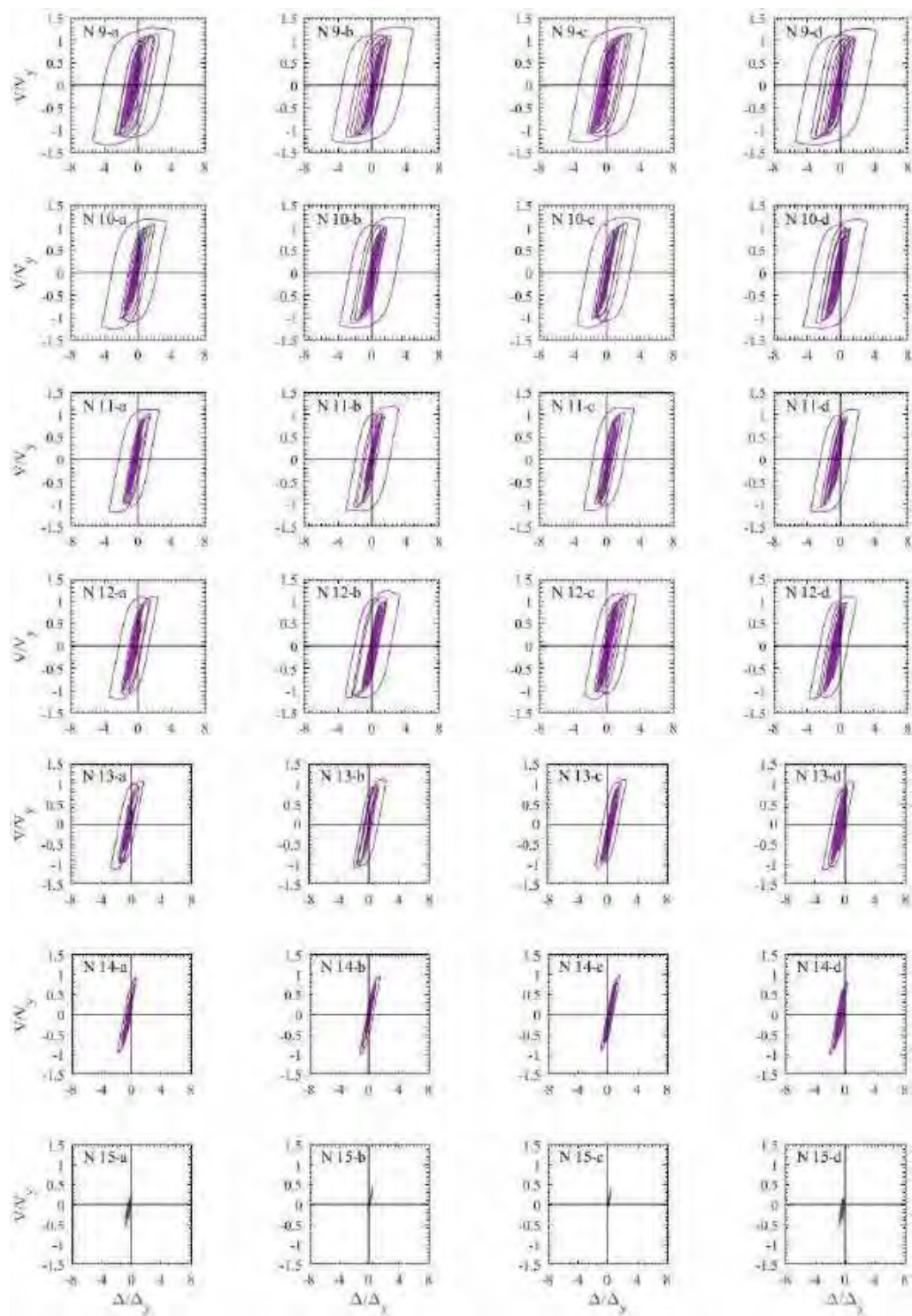
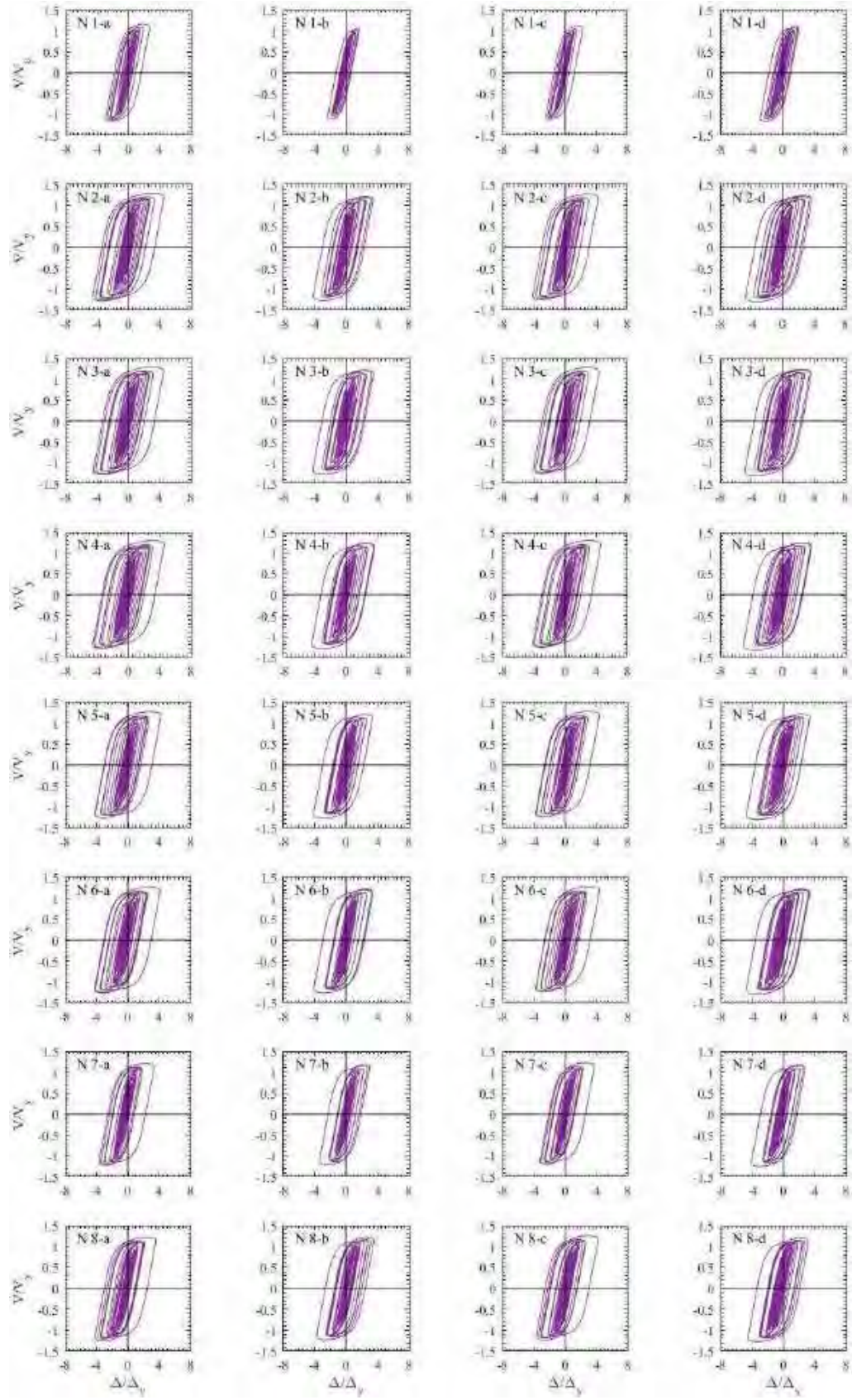


Figura G.25. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración MI15-A



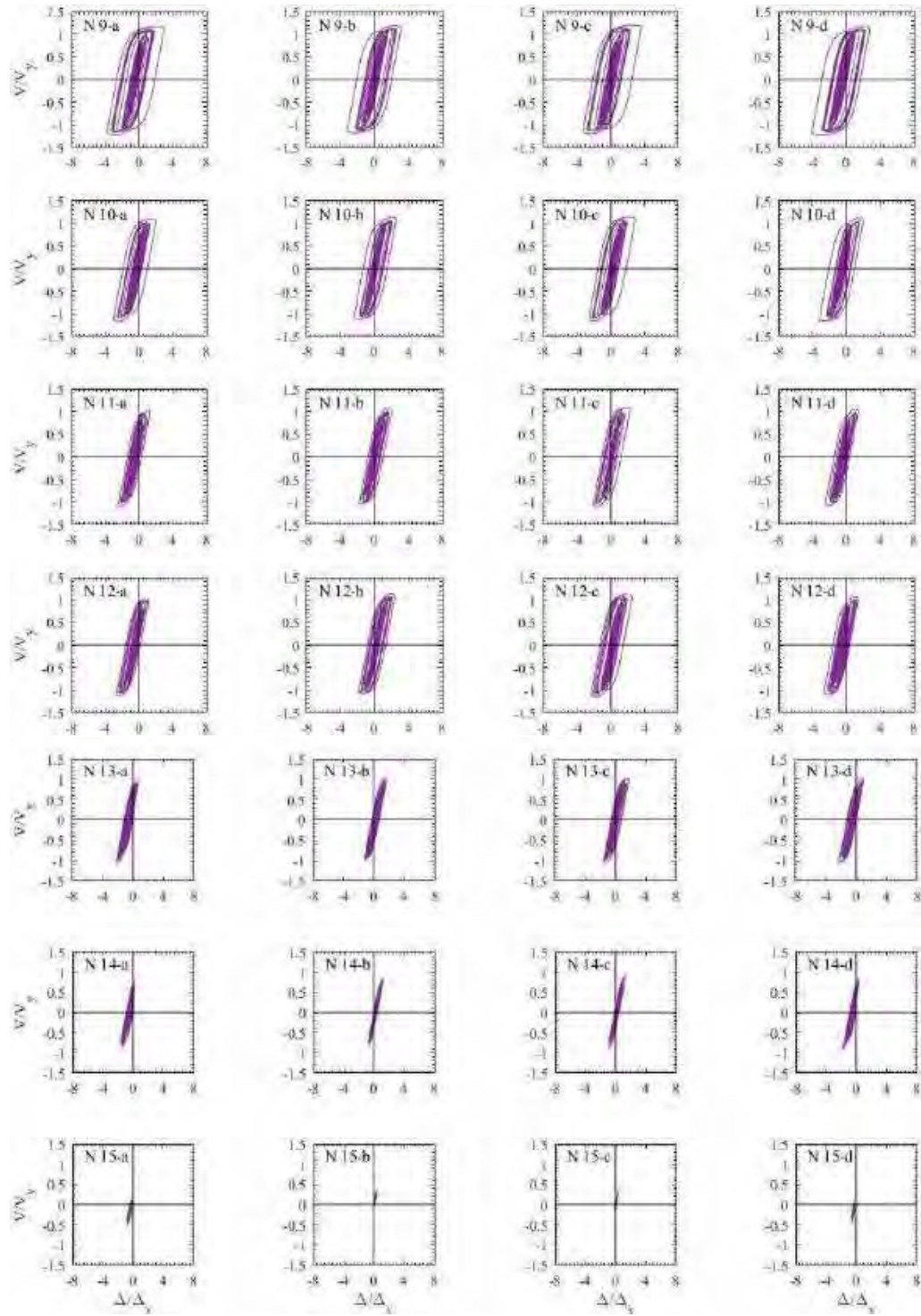
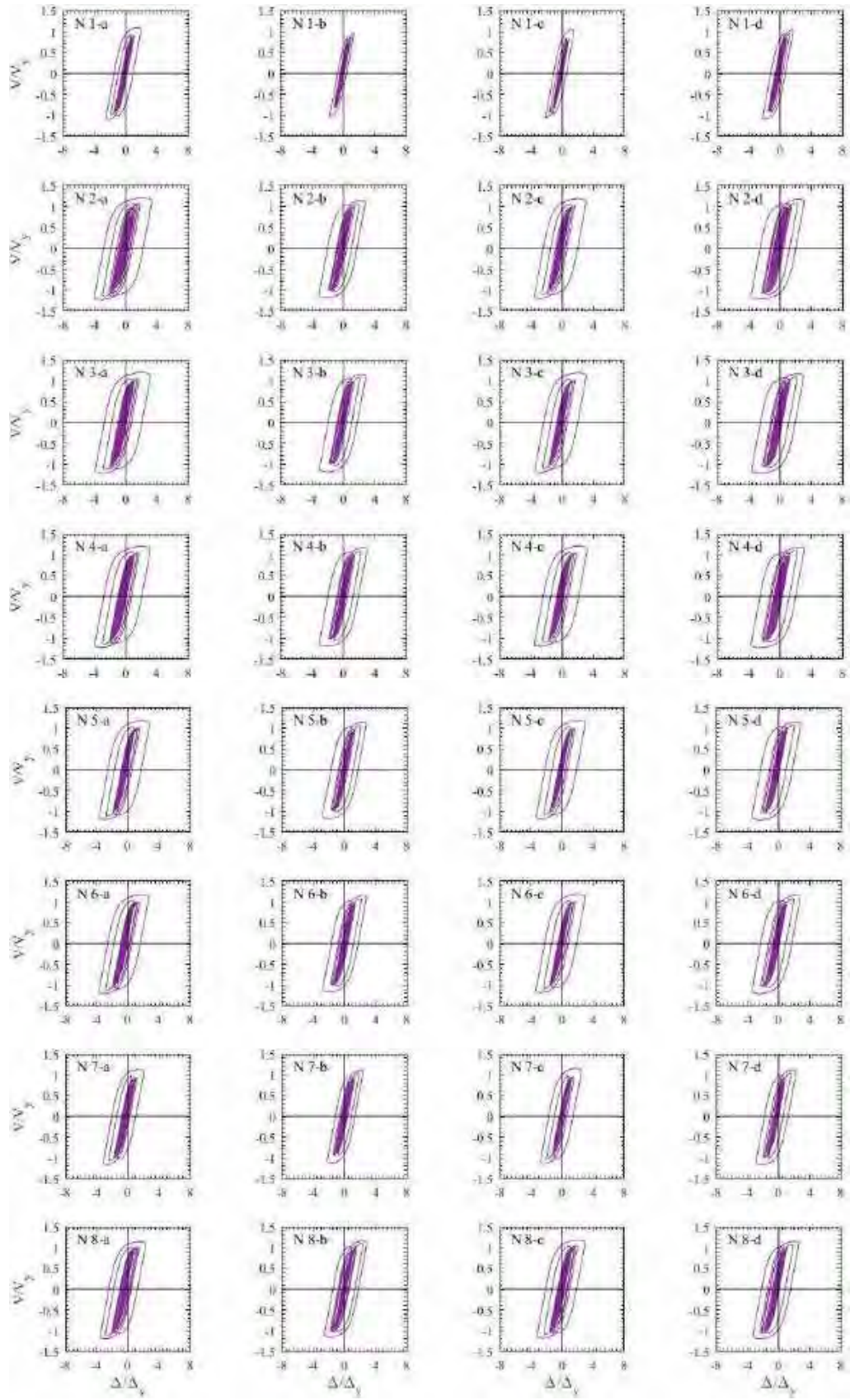


Figura G.26. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración MI15-B



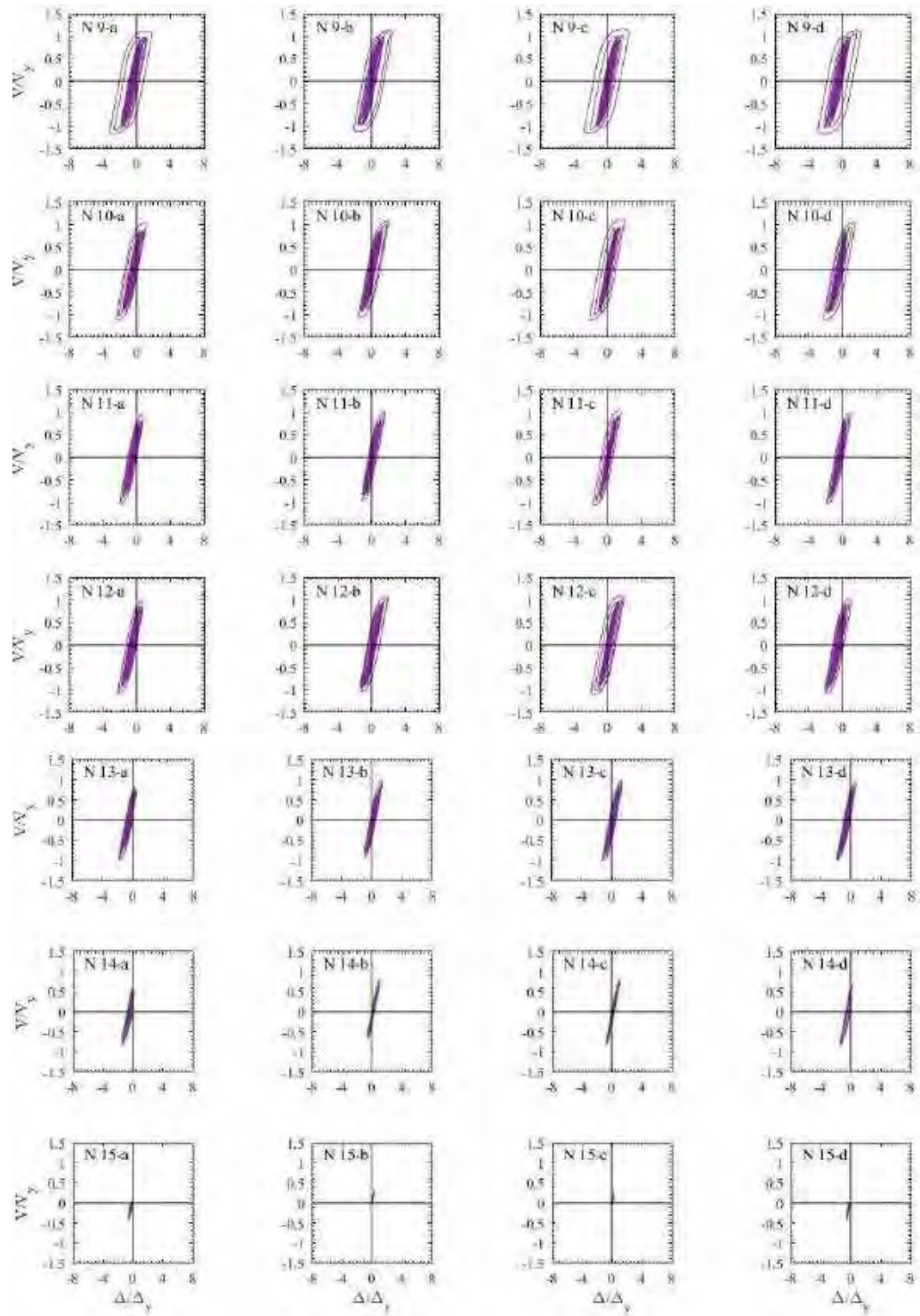
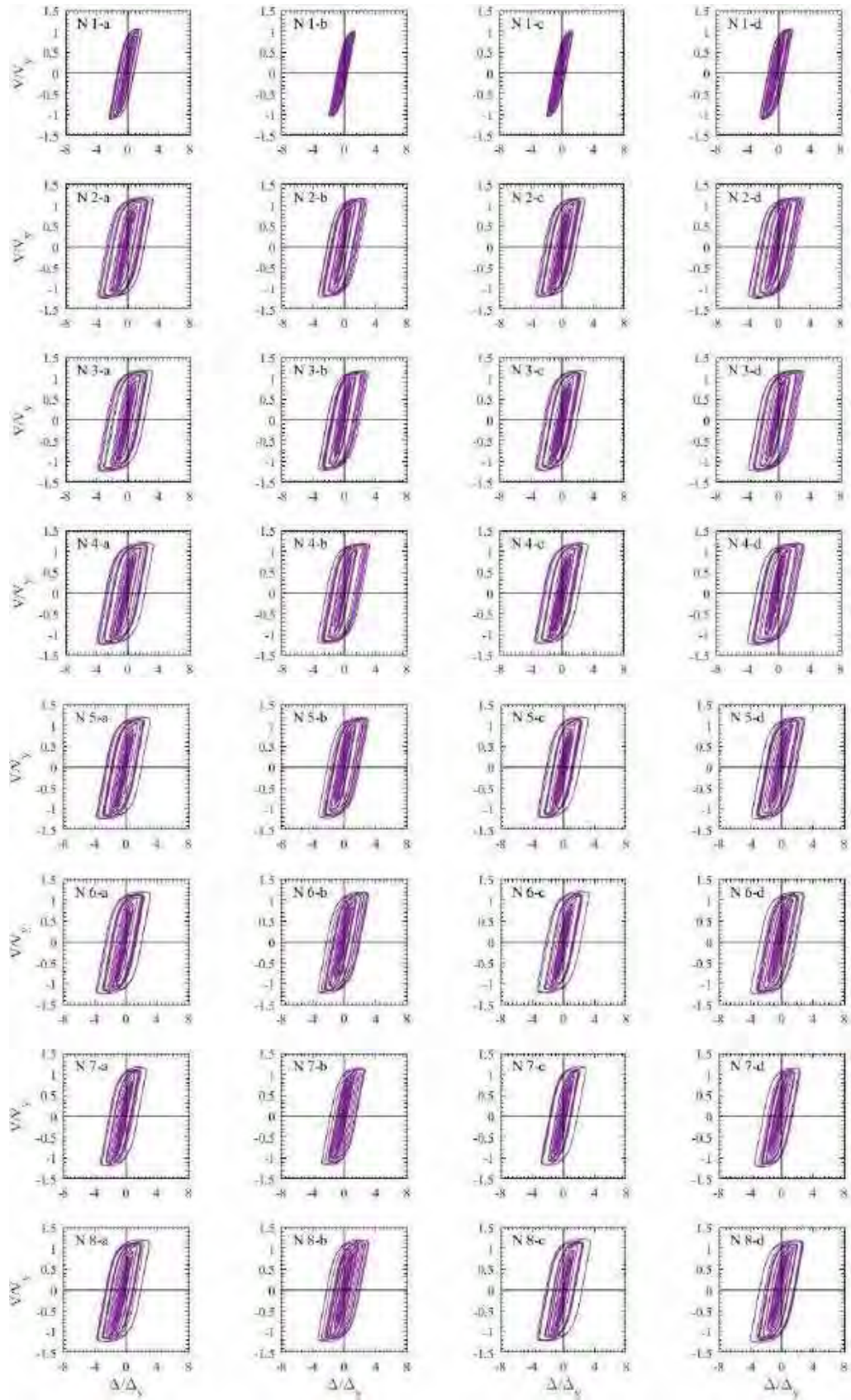


Figura G.27. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CU80-A (2017)



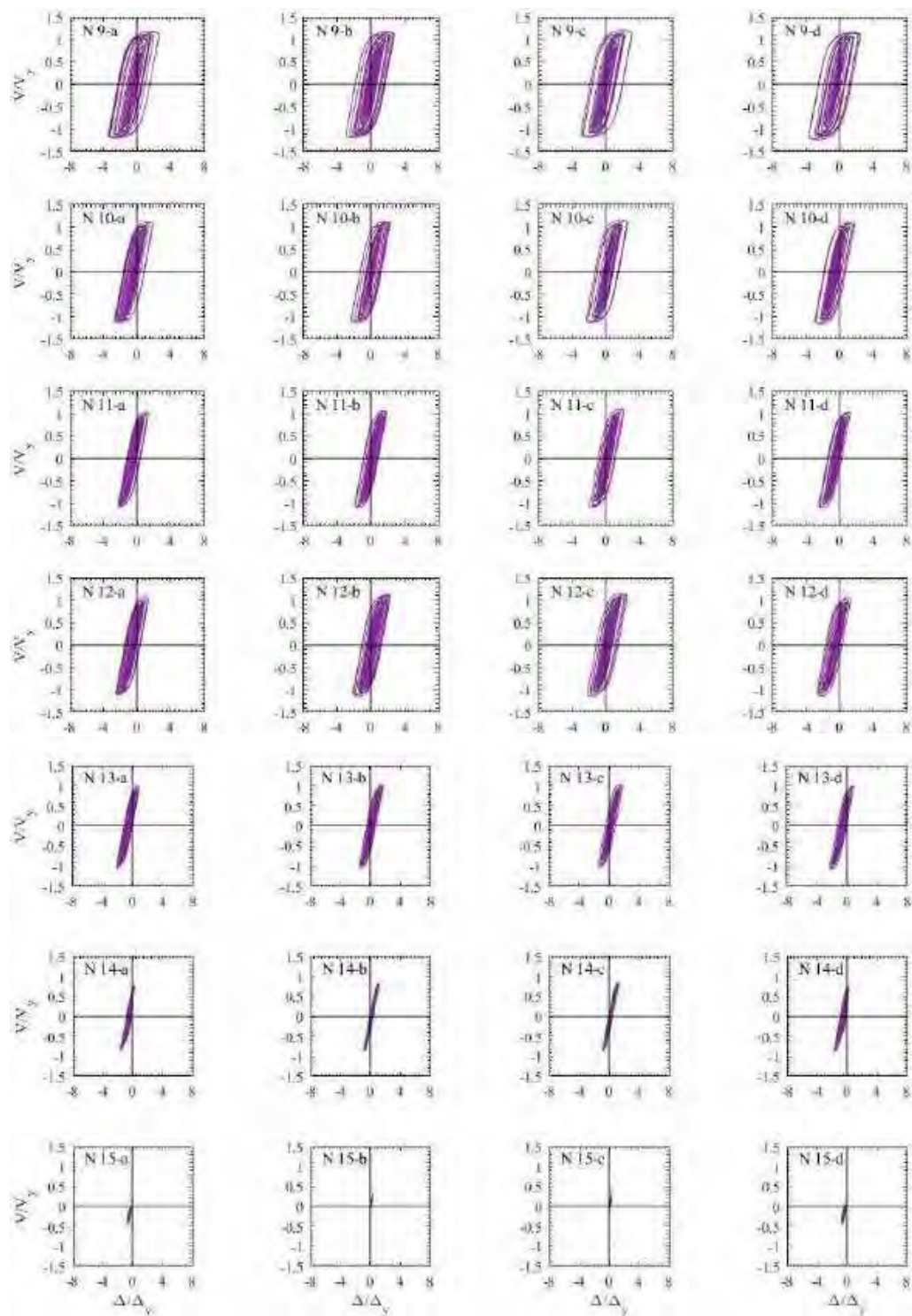
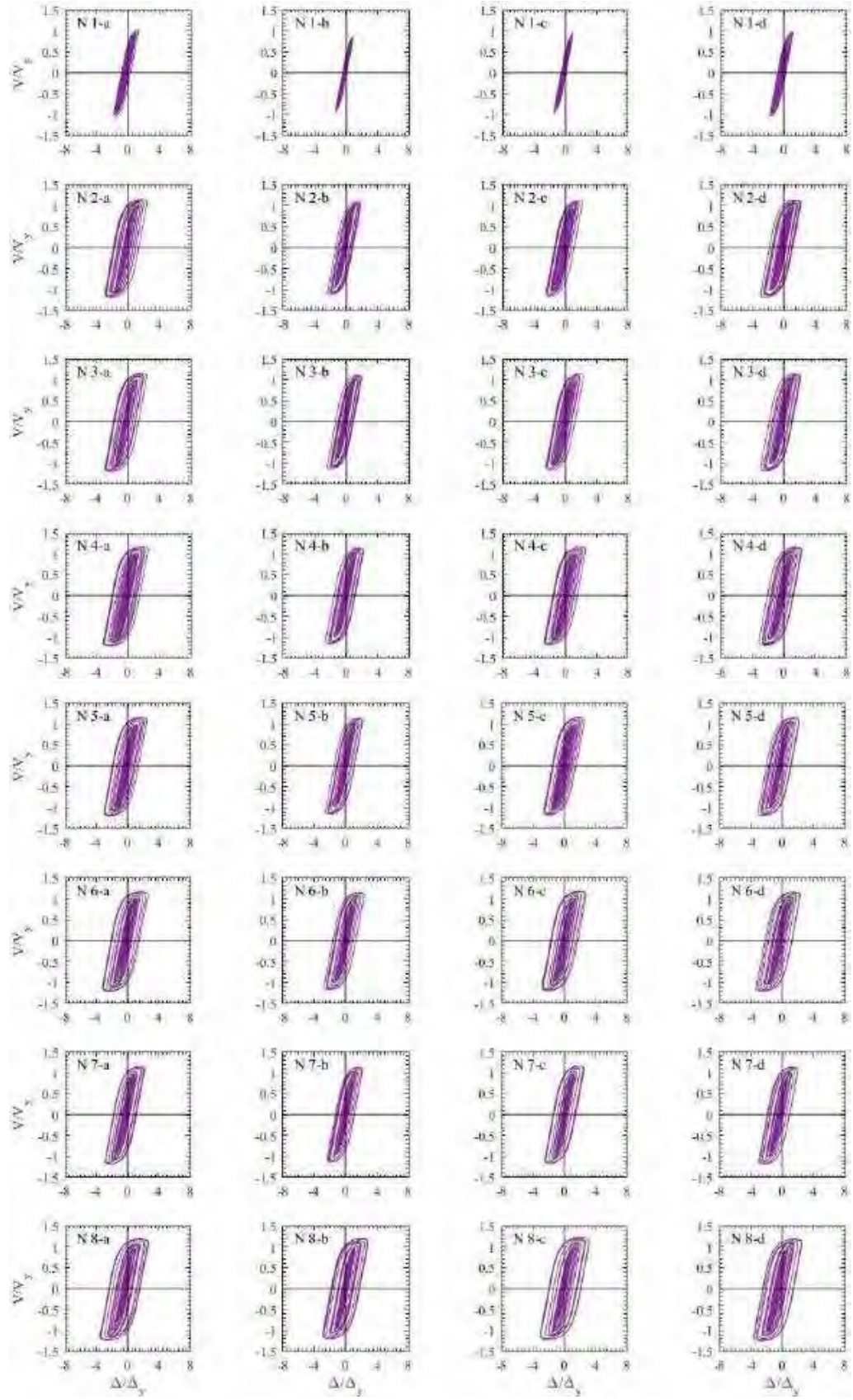


Figura G.28. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CU80-B (2017)



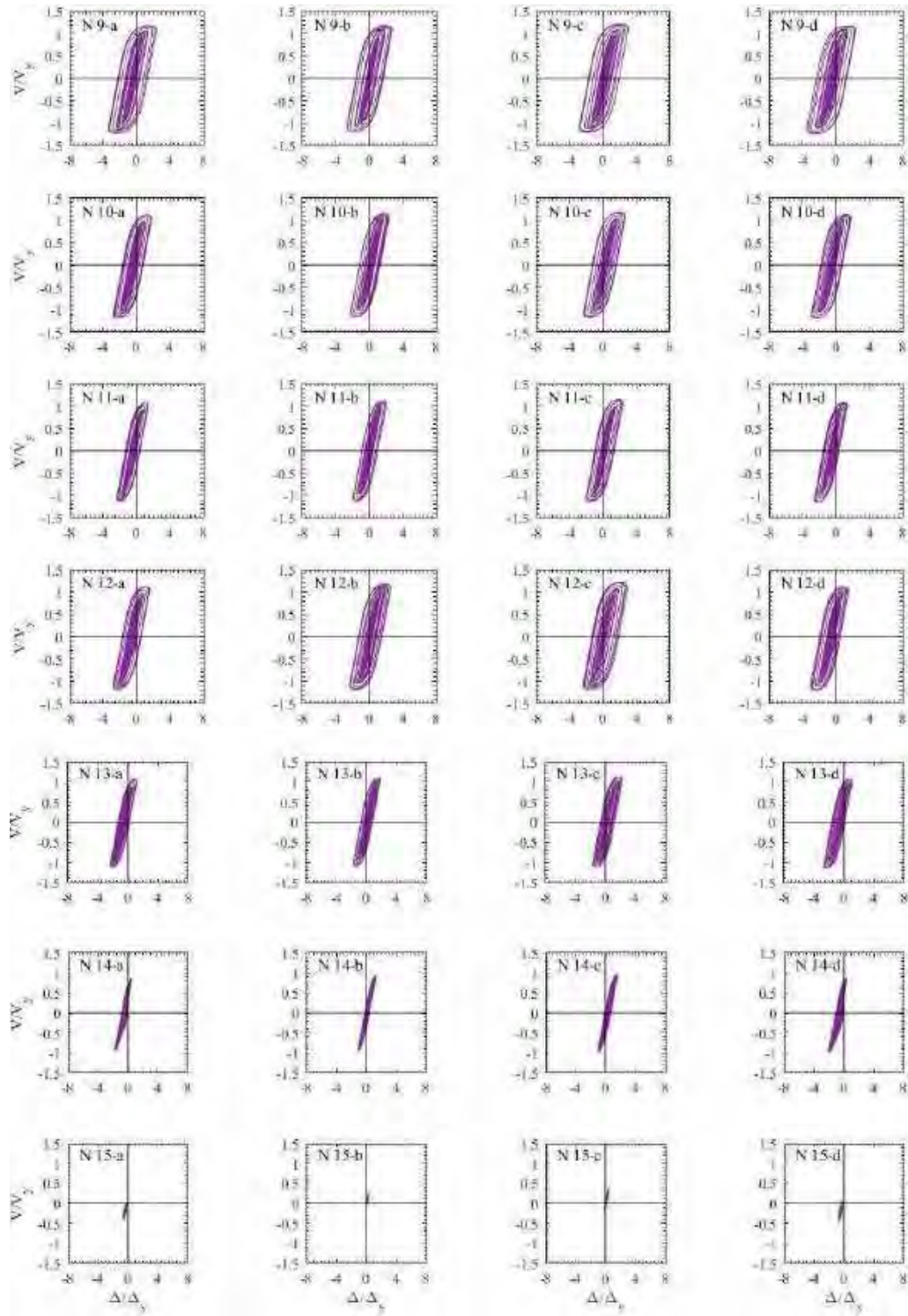
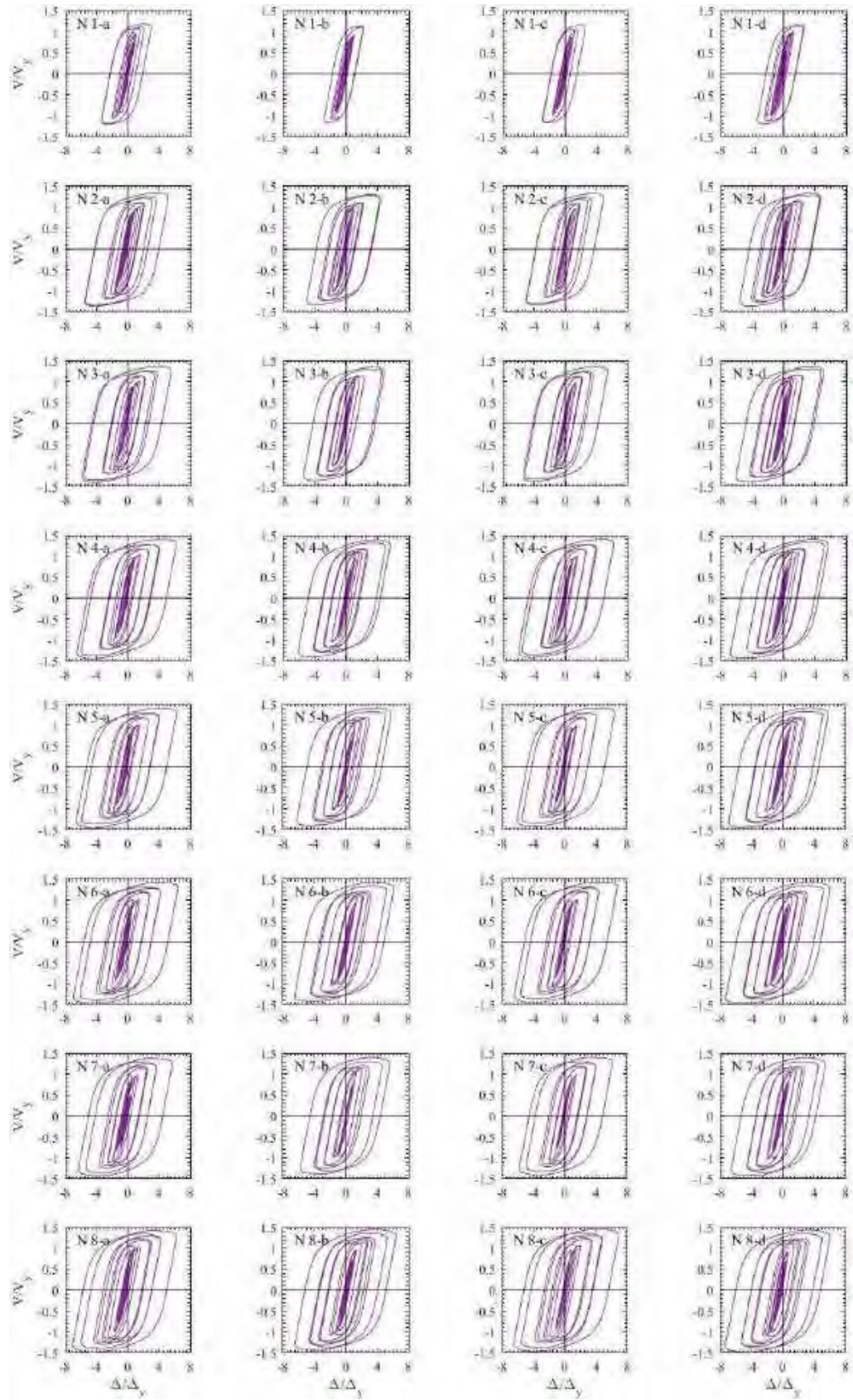


Figura G.29. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DX37-A (2017)



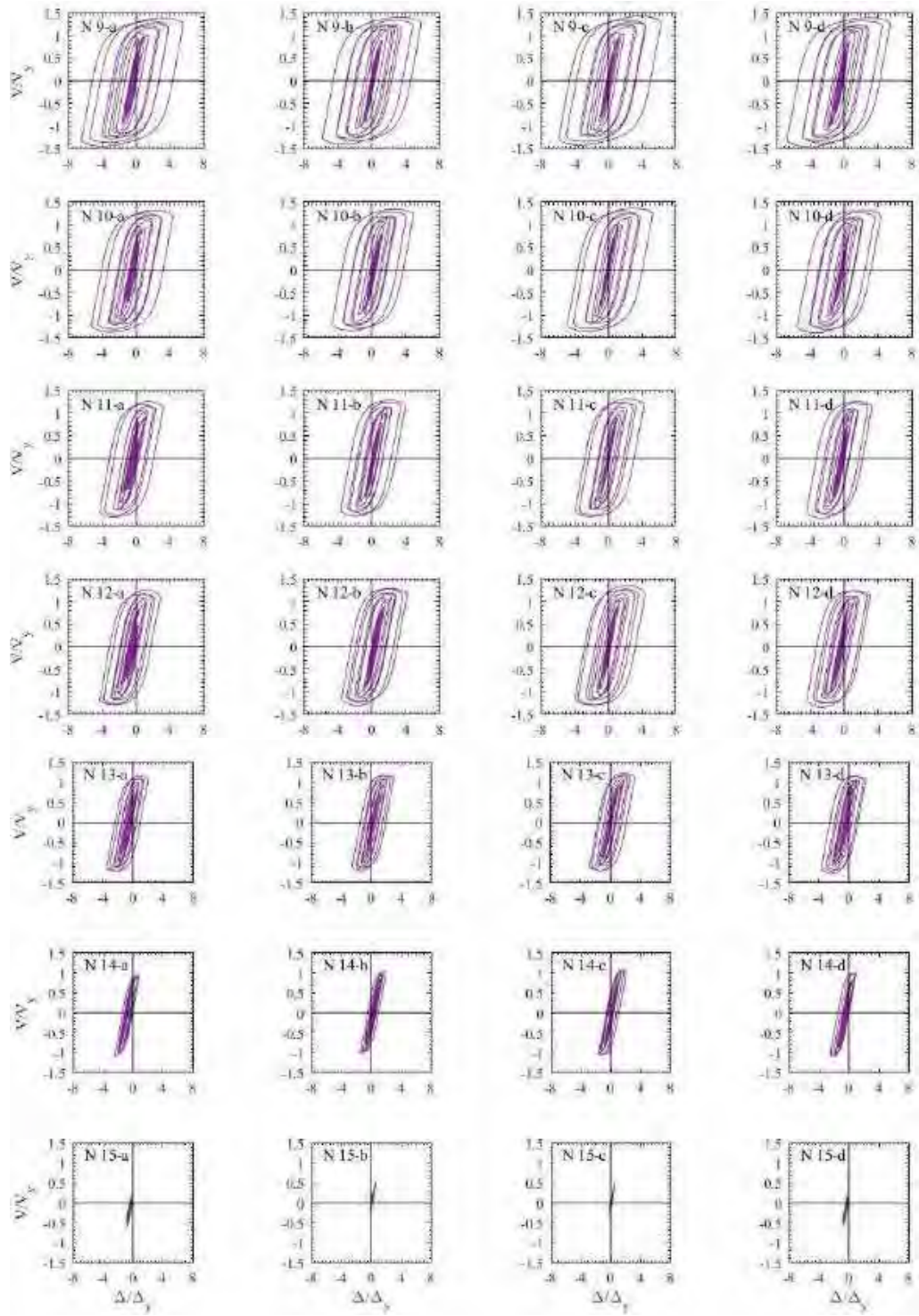
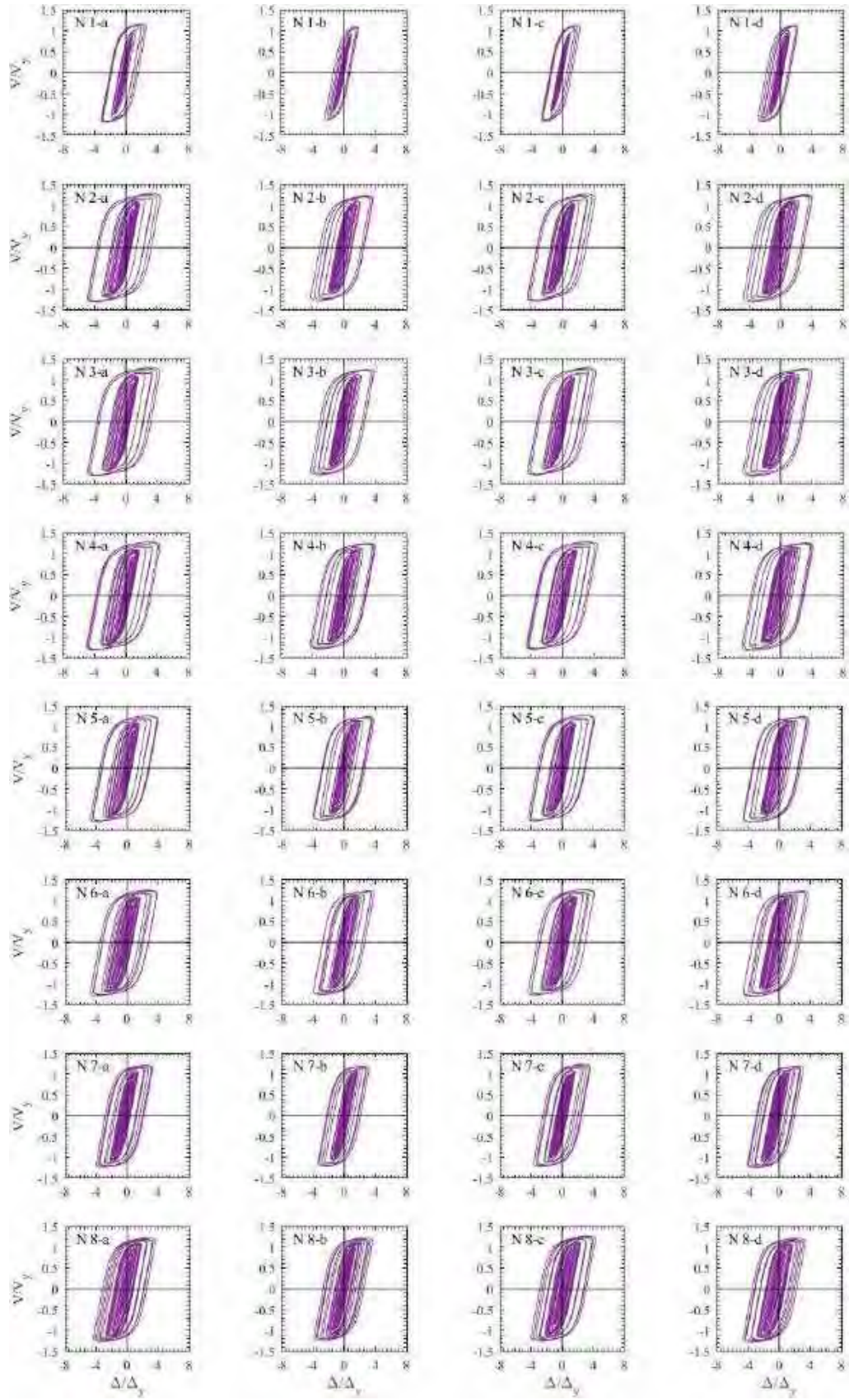


Figura G.30. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DX37-B (2017)



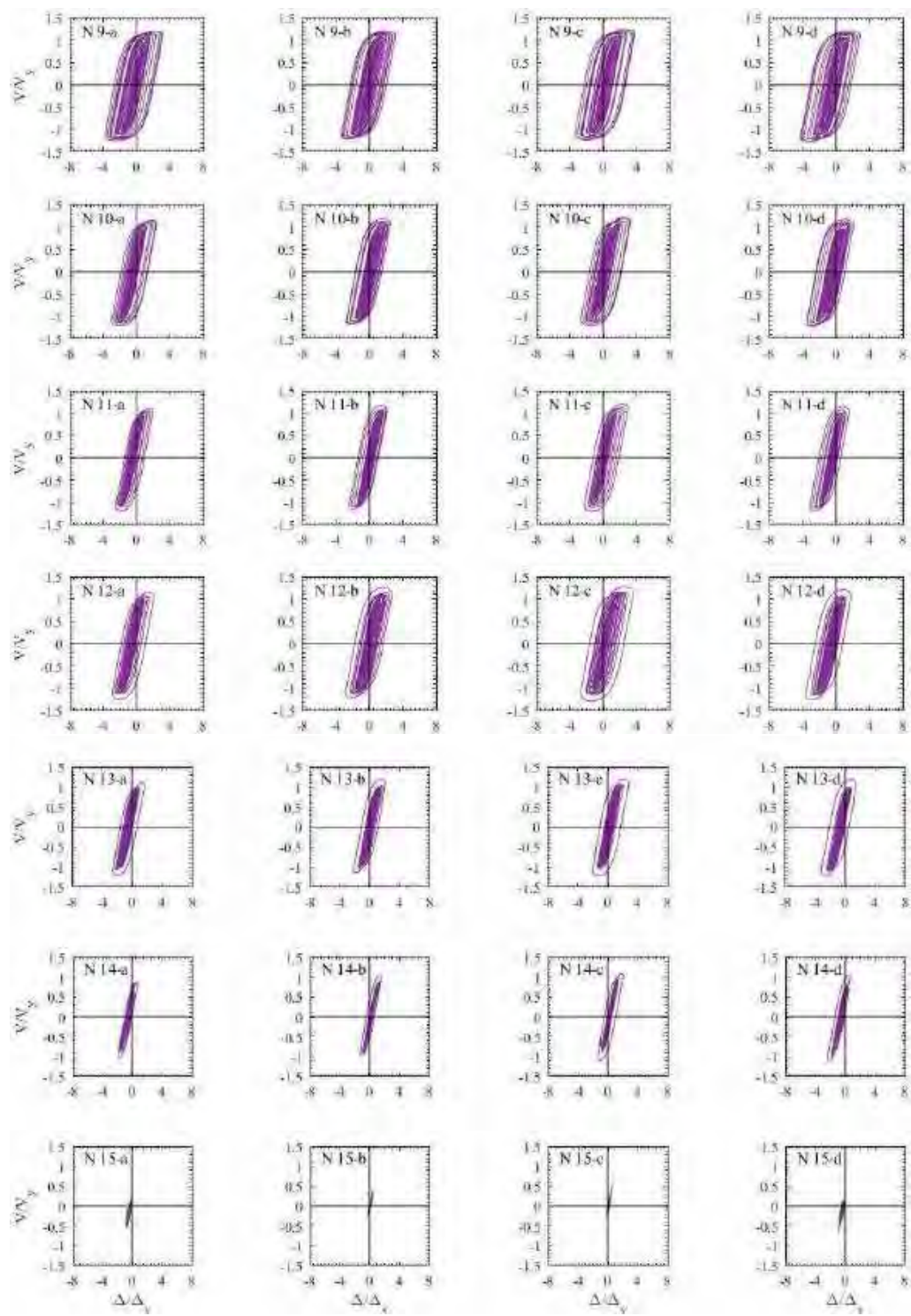
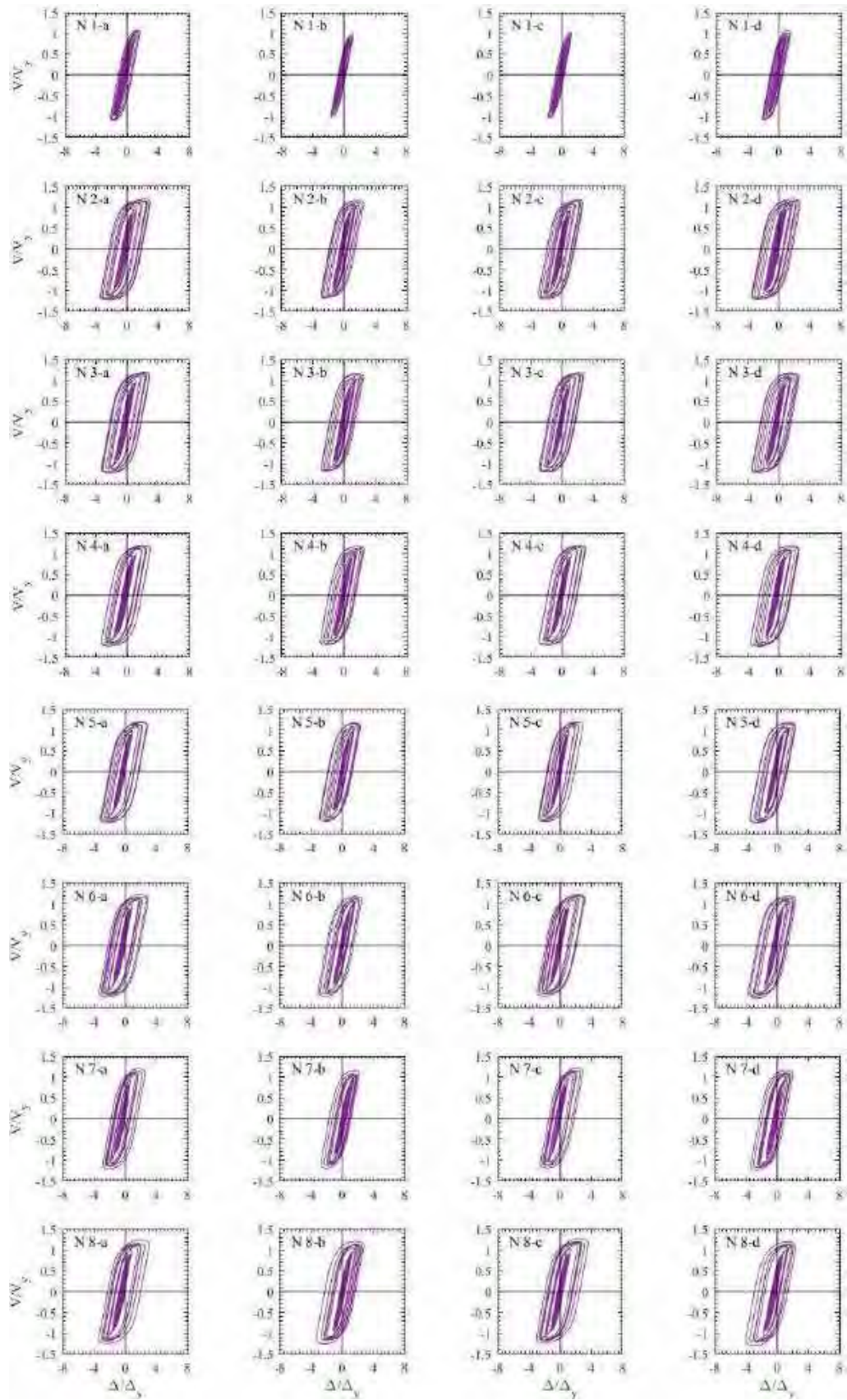


Figura G.31. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración JC54-A (2017)



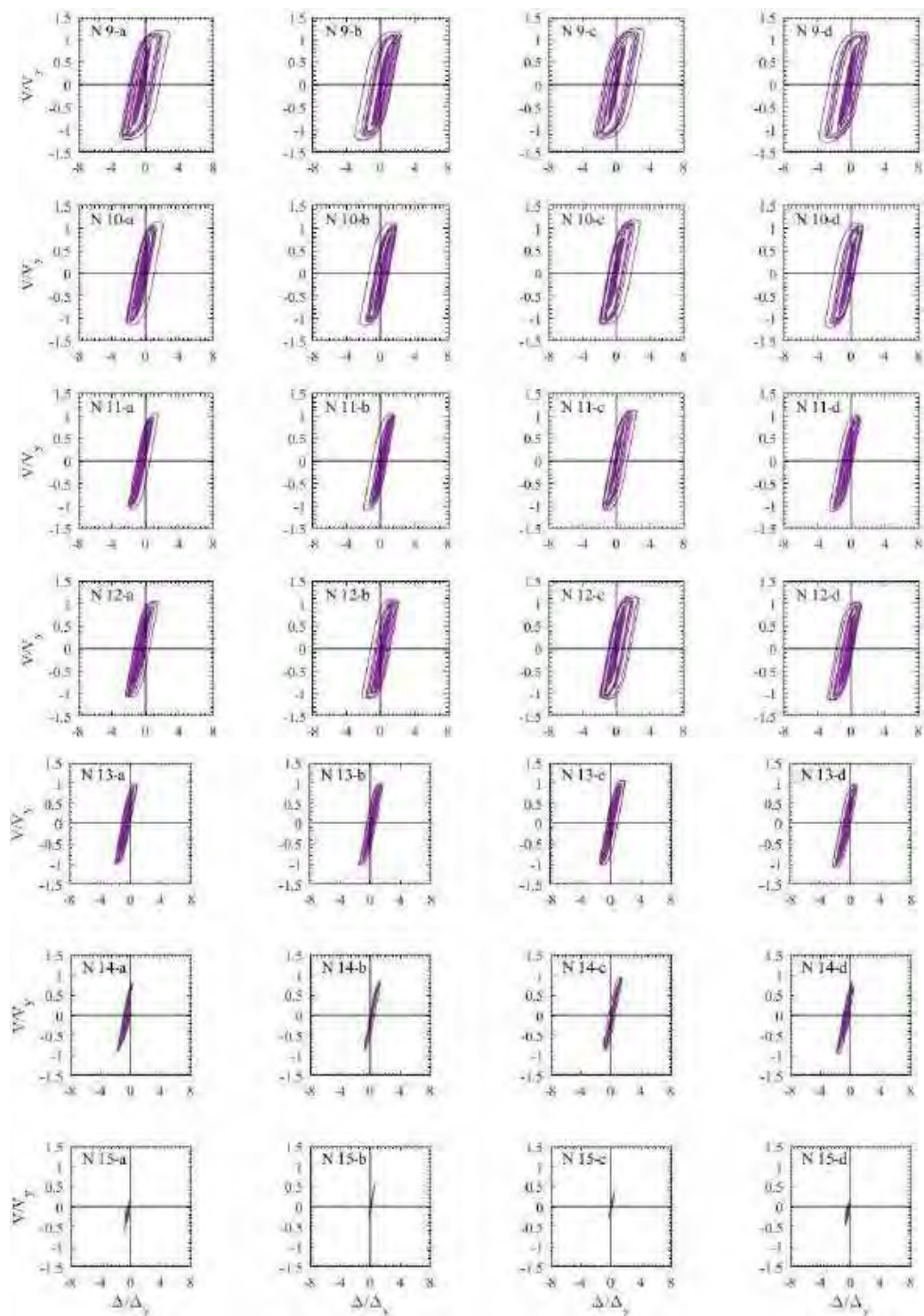


Figura G.32. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.1.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x

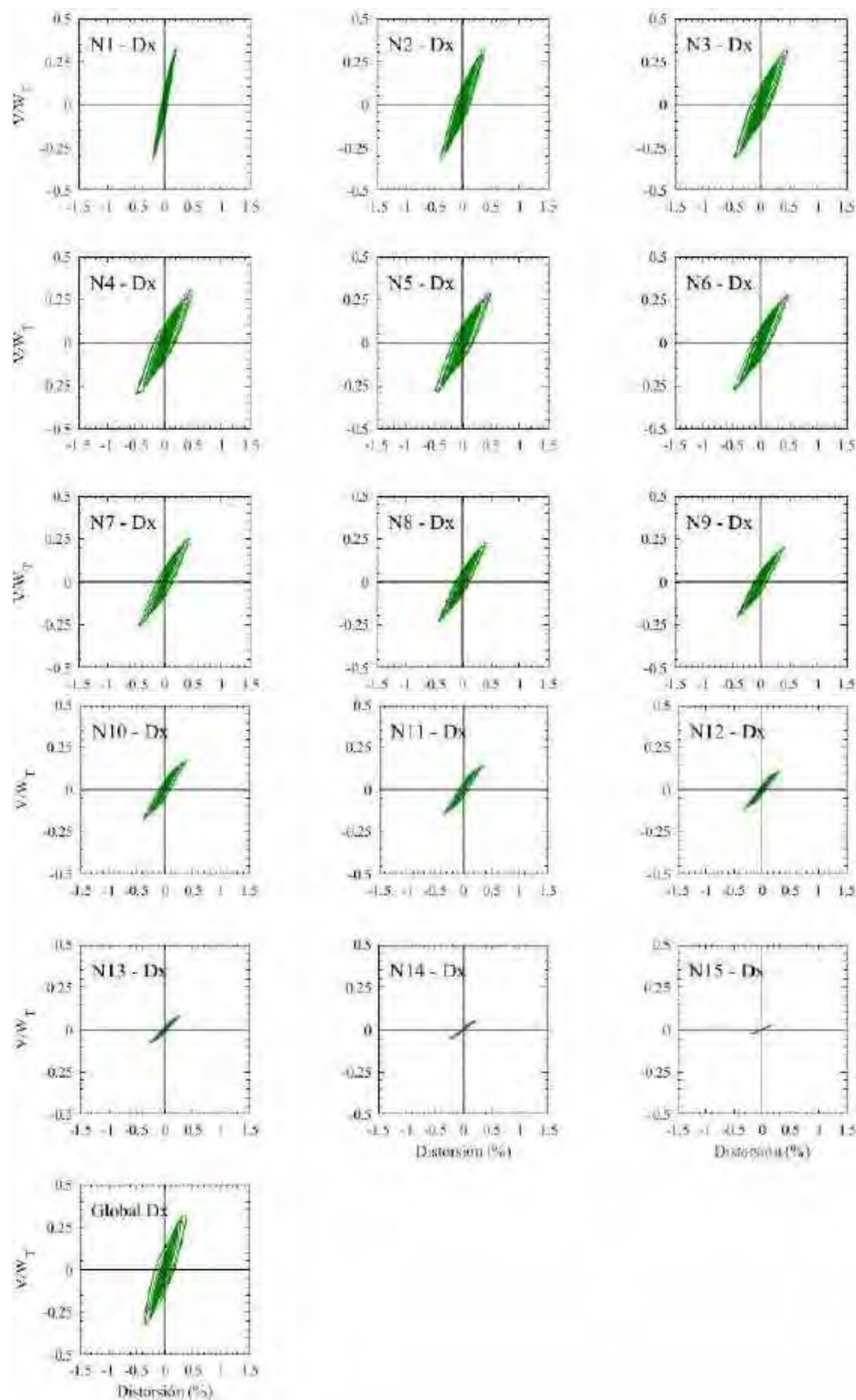


Figura G.33. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración CM-A

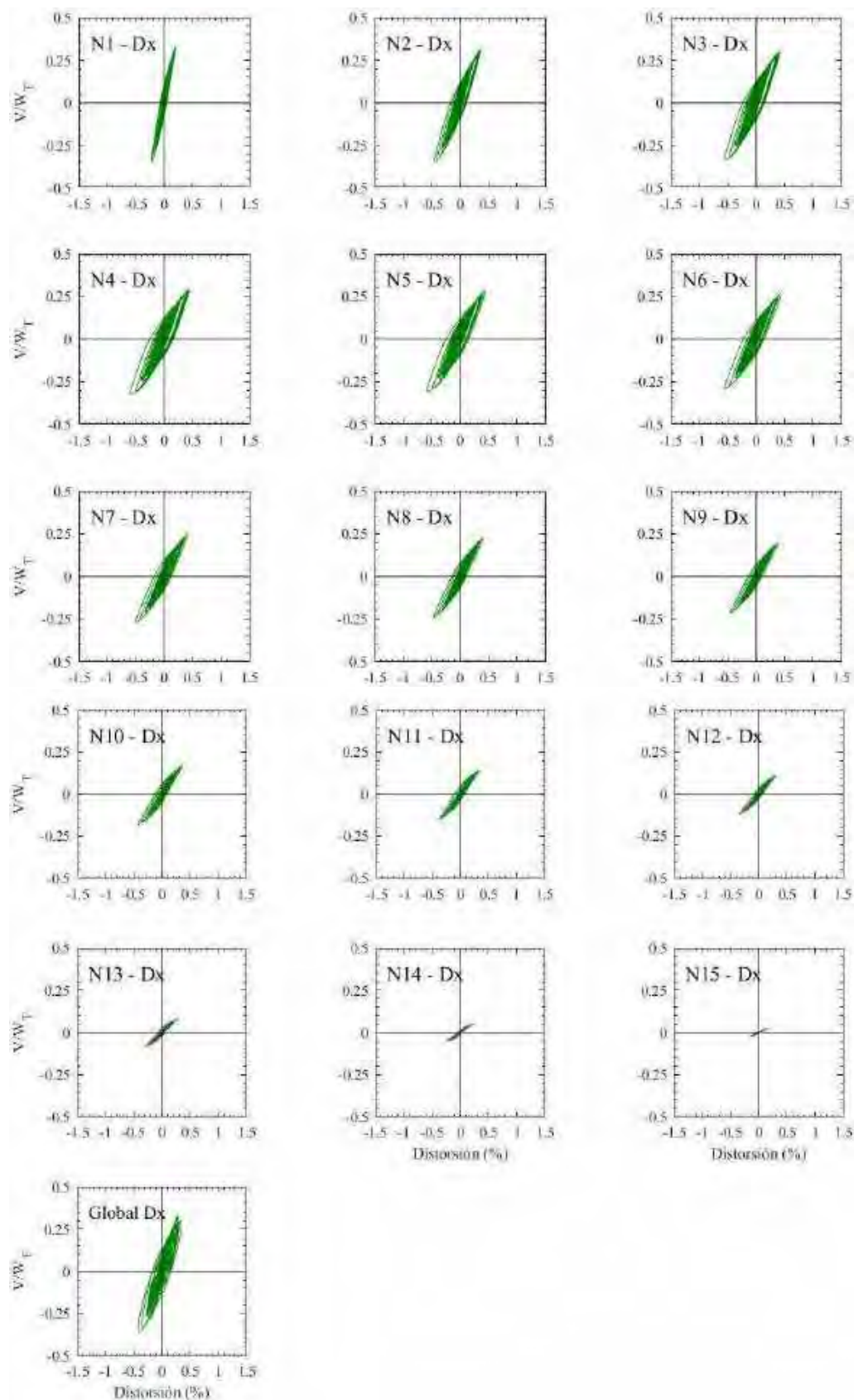


Figura G.34. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración CM-B

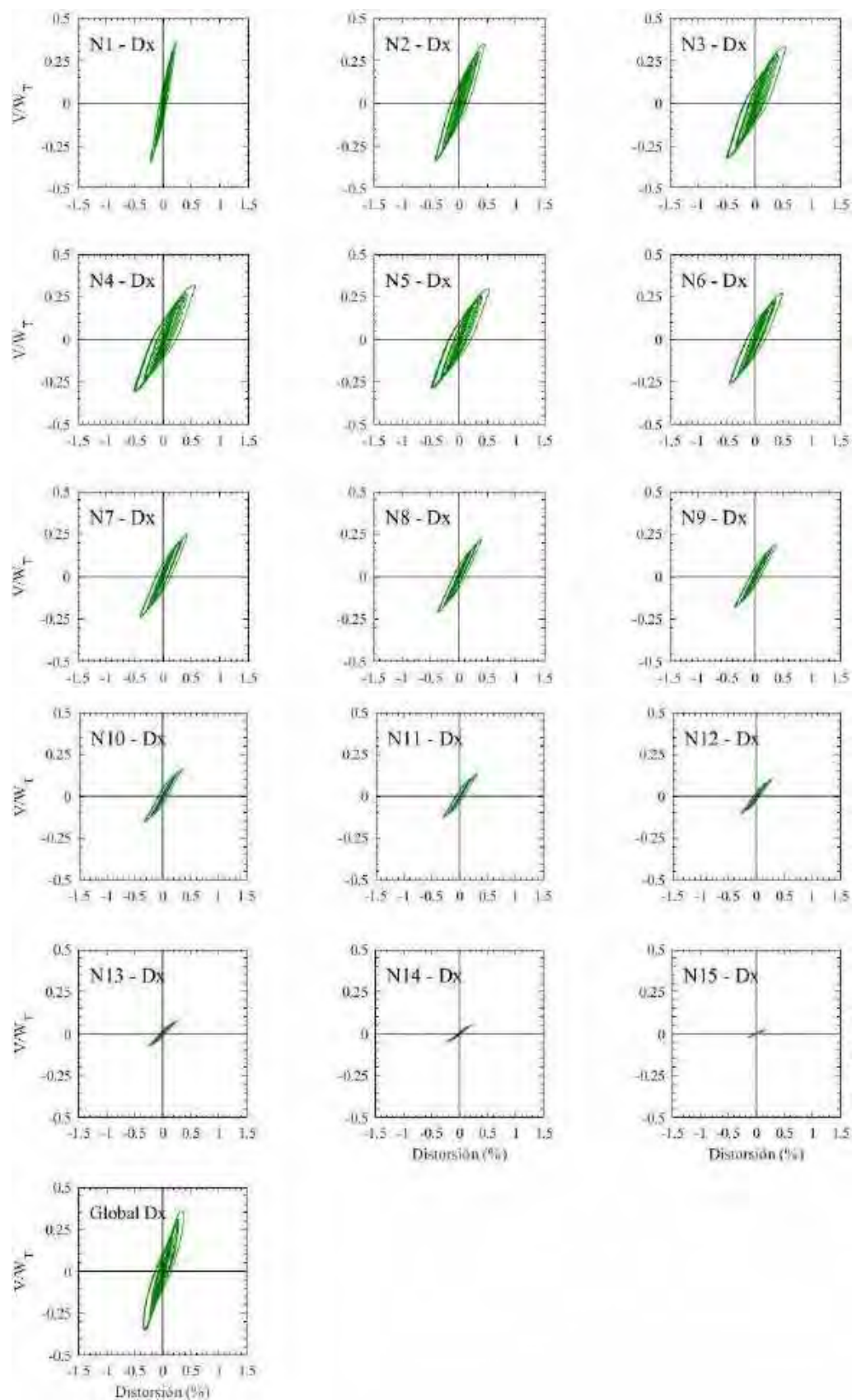


Figura G.35. Ciclos de histéresis de los entepisos en dirección x , registros de aceleración DFRO-A

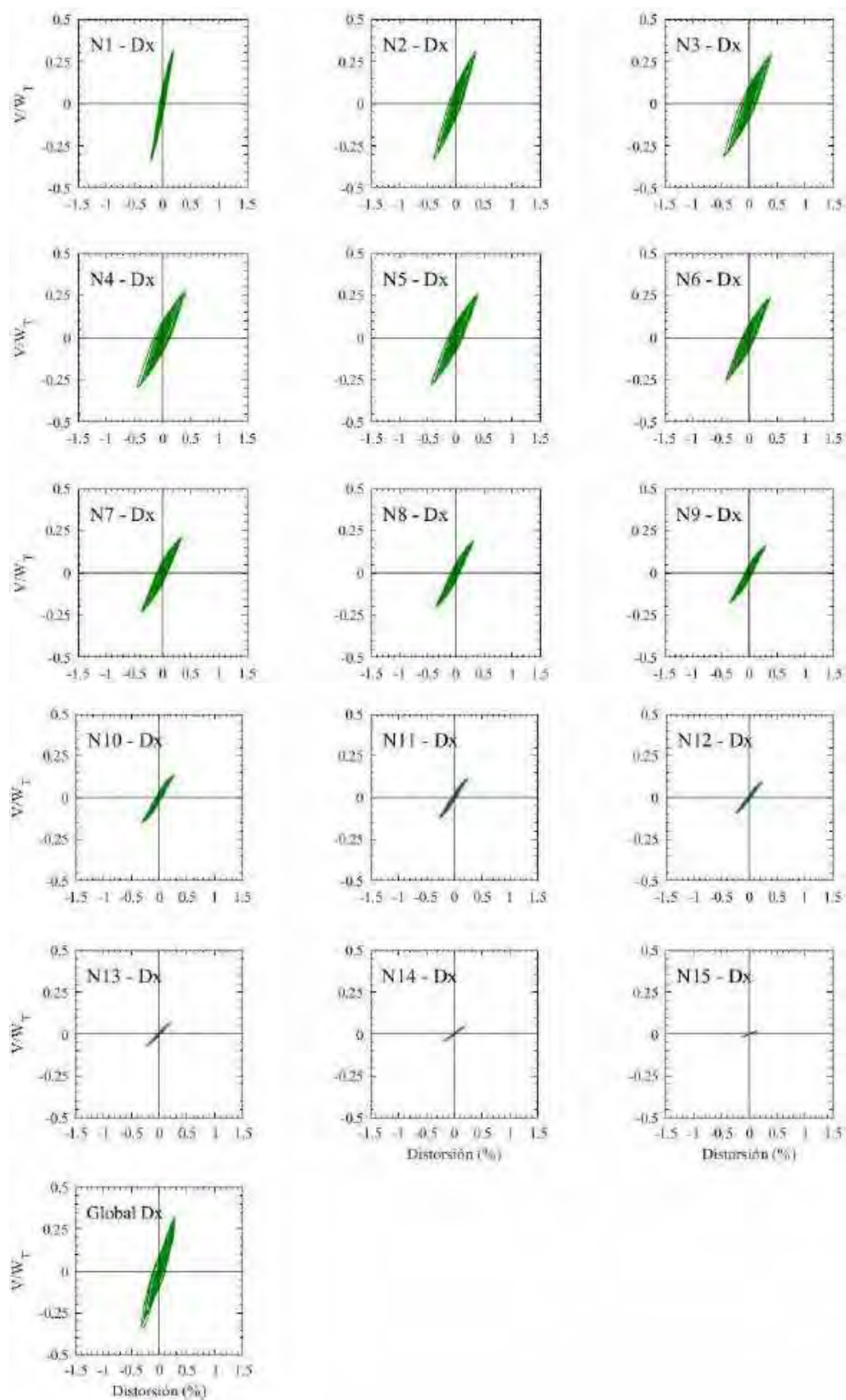


Figura G.36. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración DFRO –B

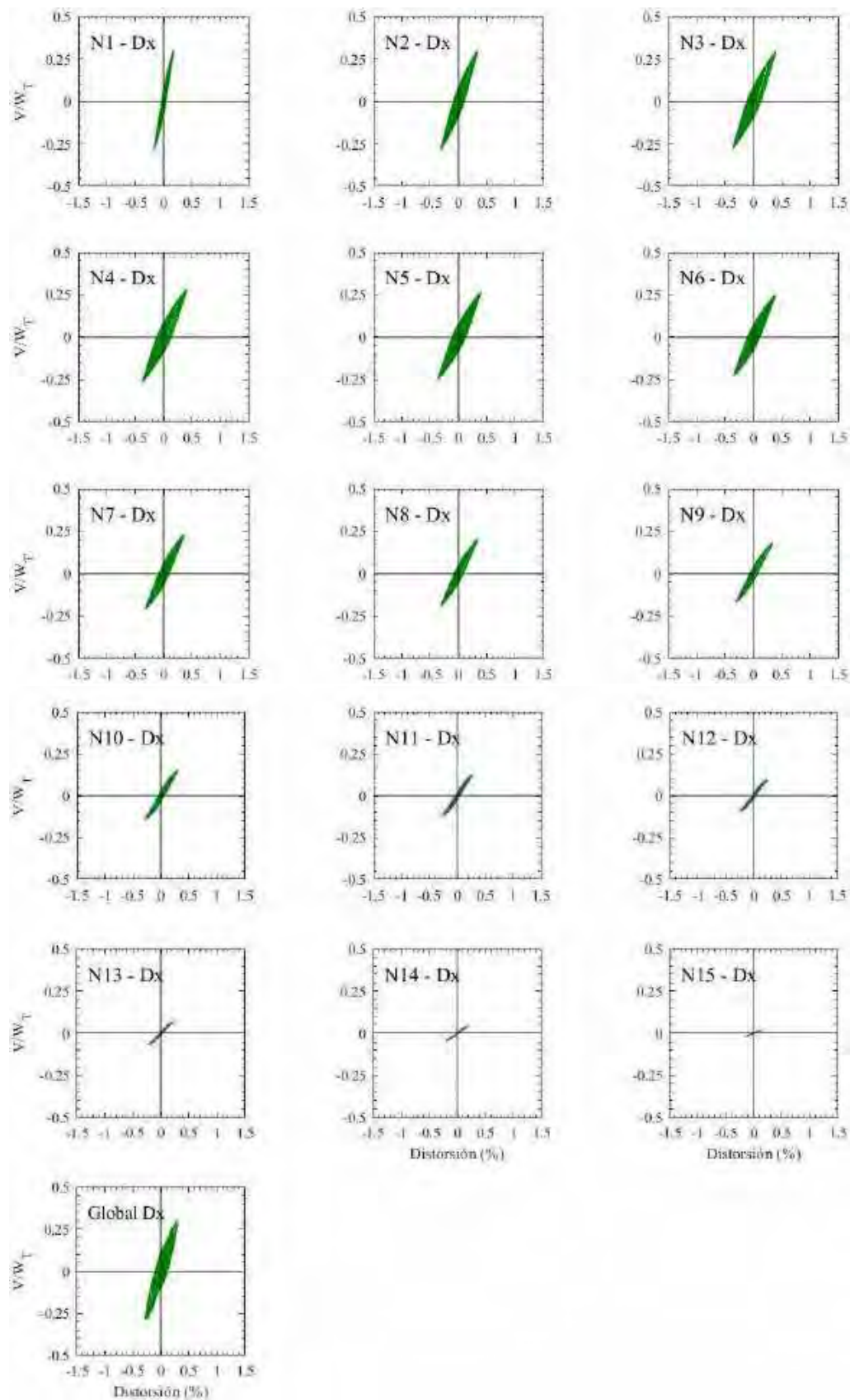


Figura G.37. Ciclos de histéresis de los entropisos en dirección x , registros de aceleración IMSR-A

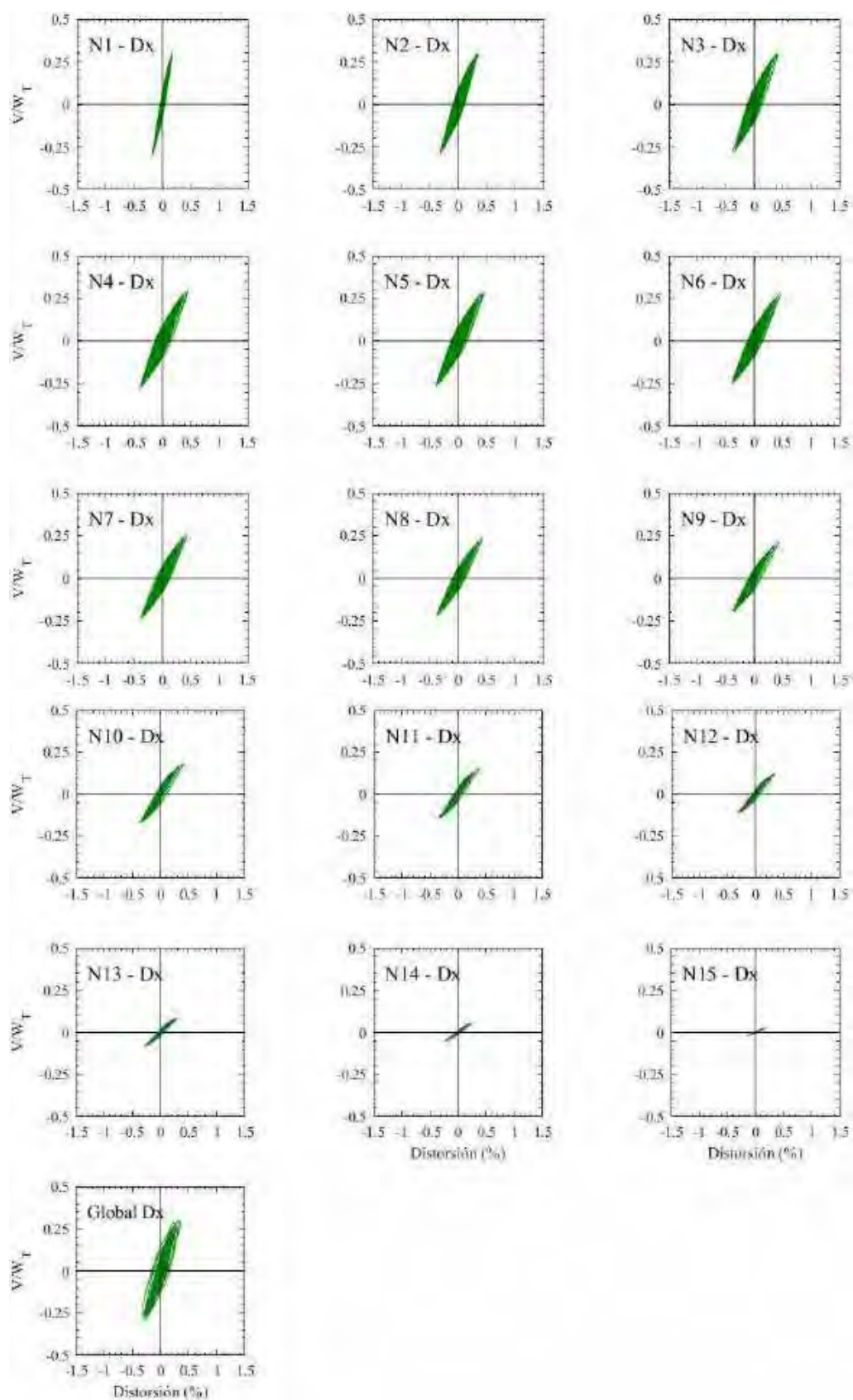


Figura G.38. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración IMSR –B

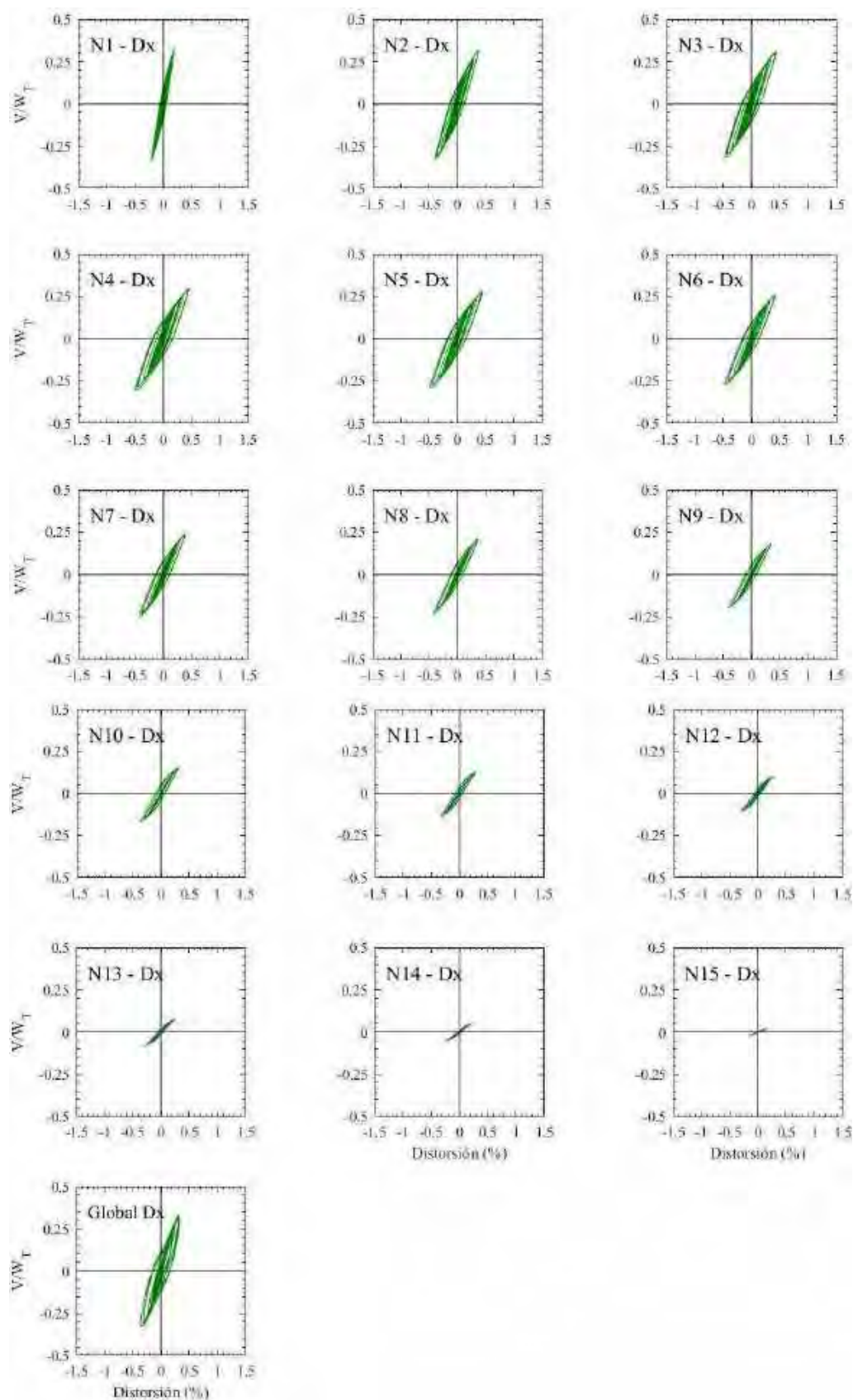


Figura G.39. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración SMR-A

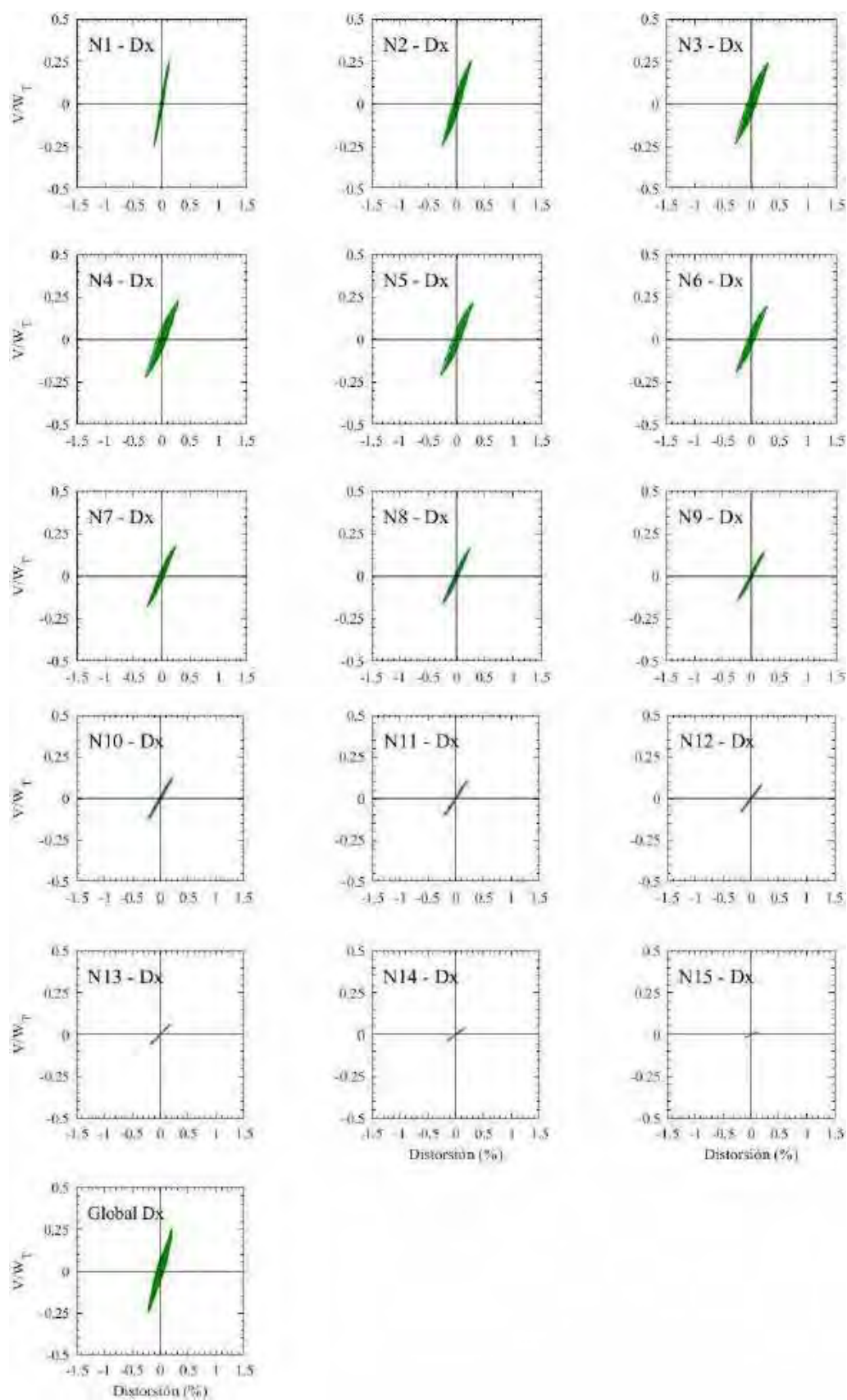


Figura G.40. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración SMR –B

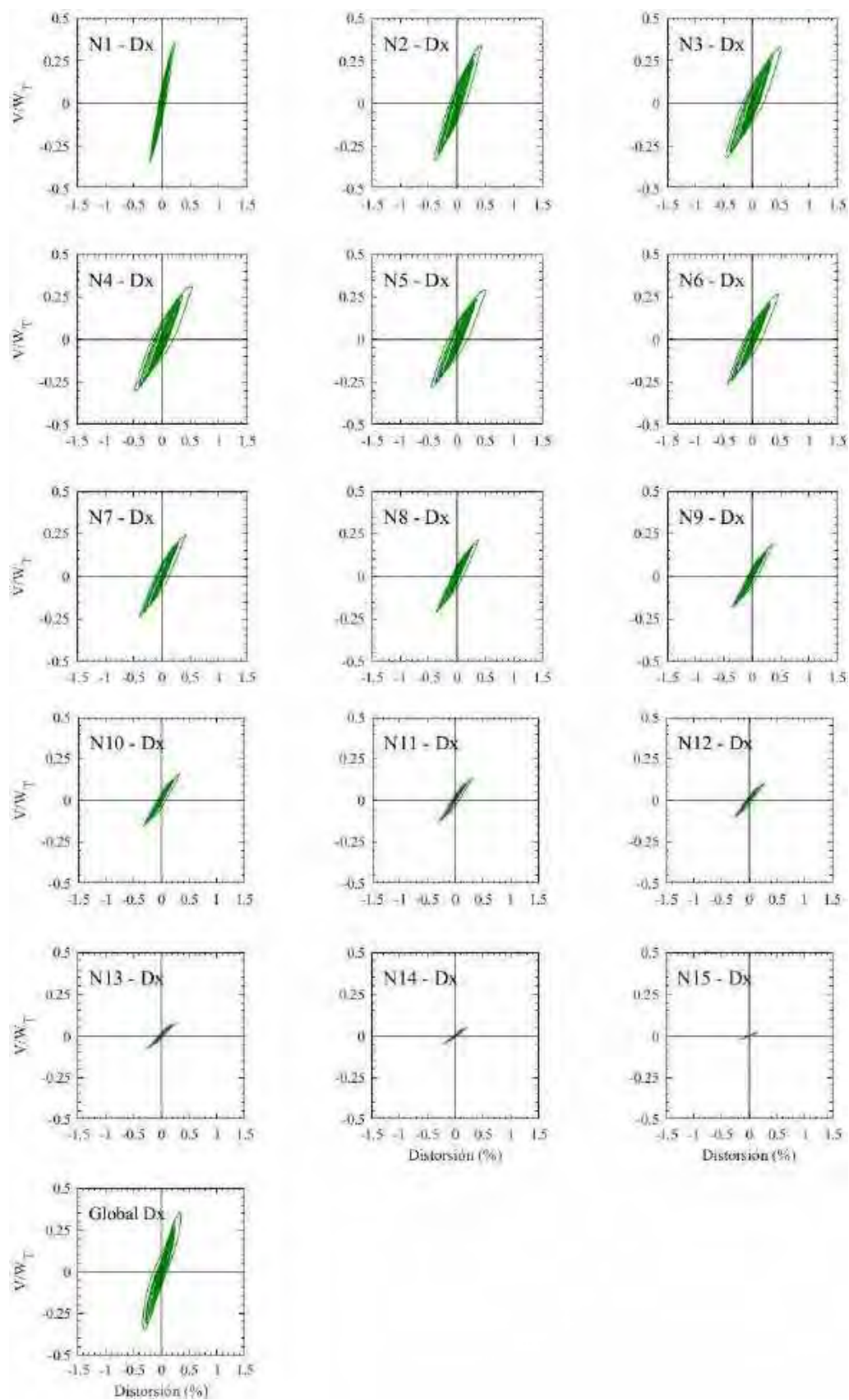


Figura G.41. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración MI15-A

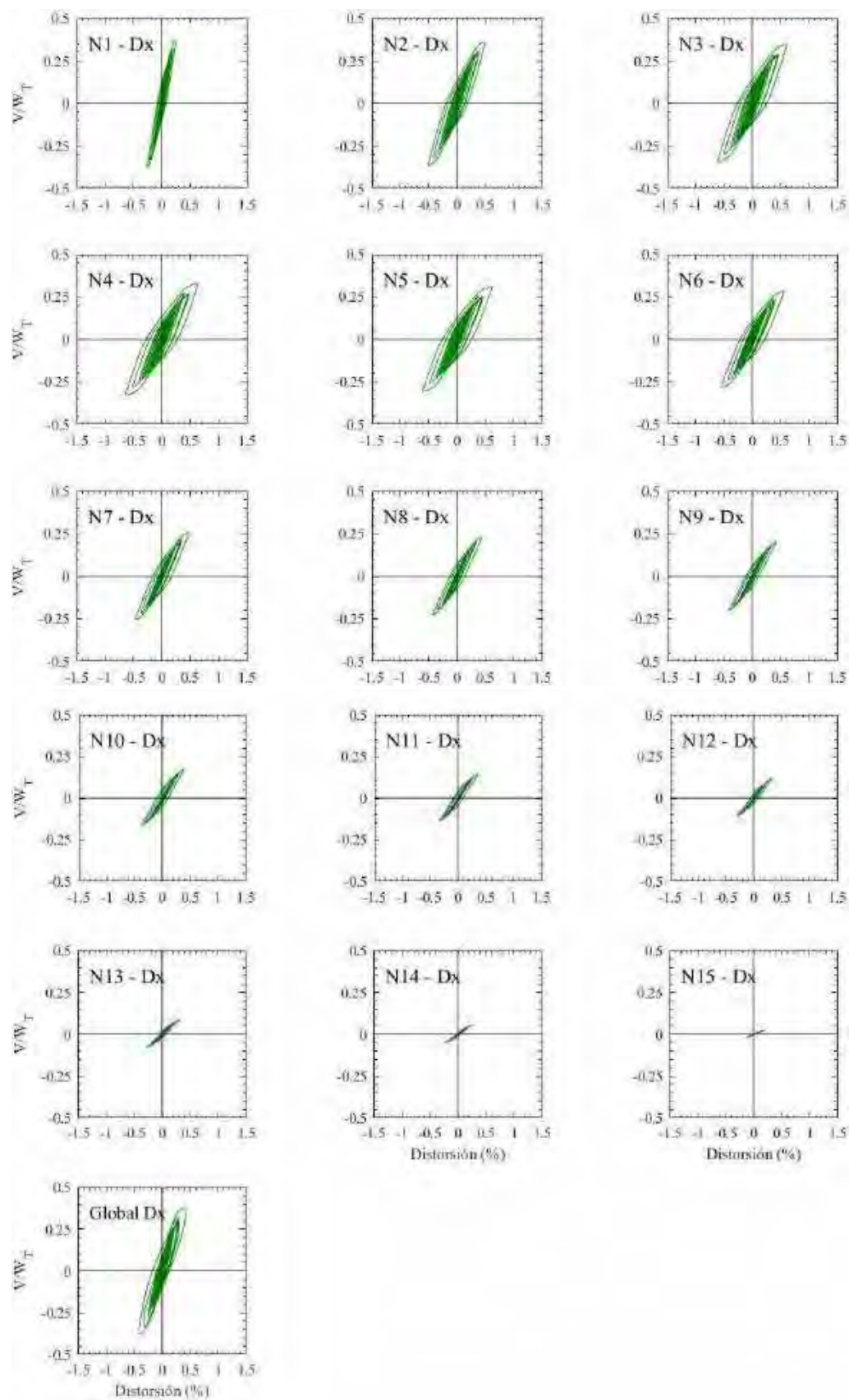


Figura G.42. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración MI15-B

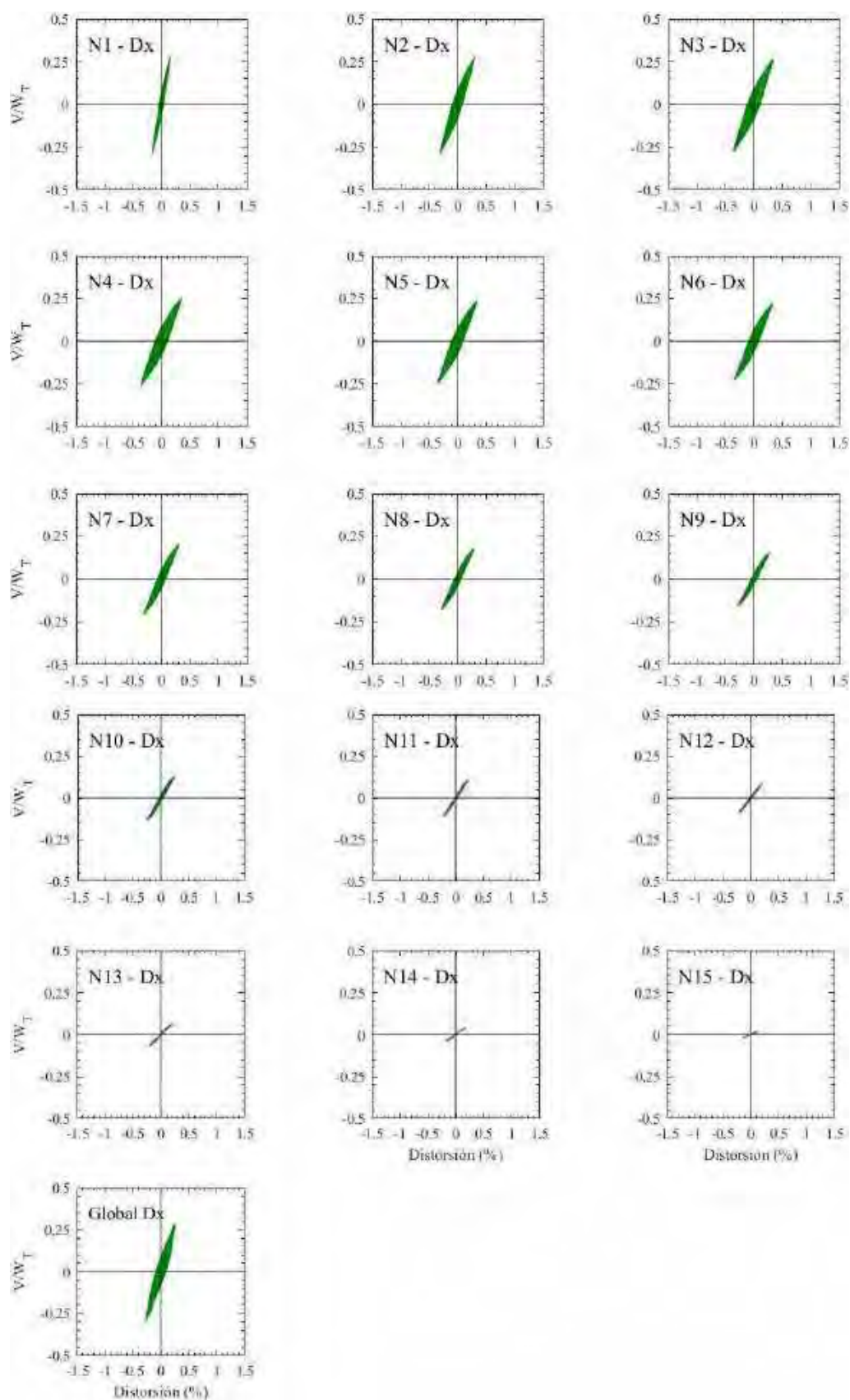


Figura G.43. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección x, registros de aceleración CU80-A (2017)

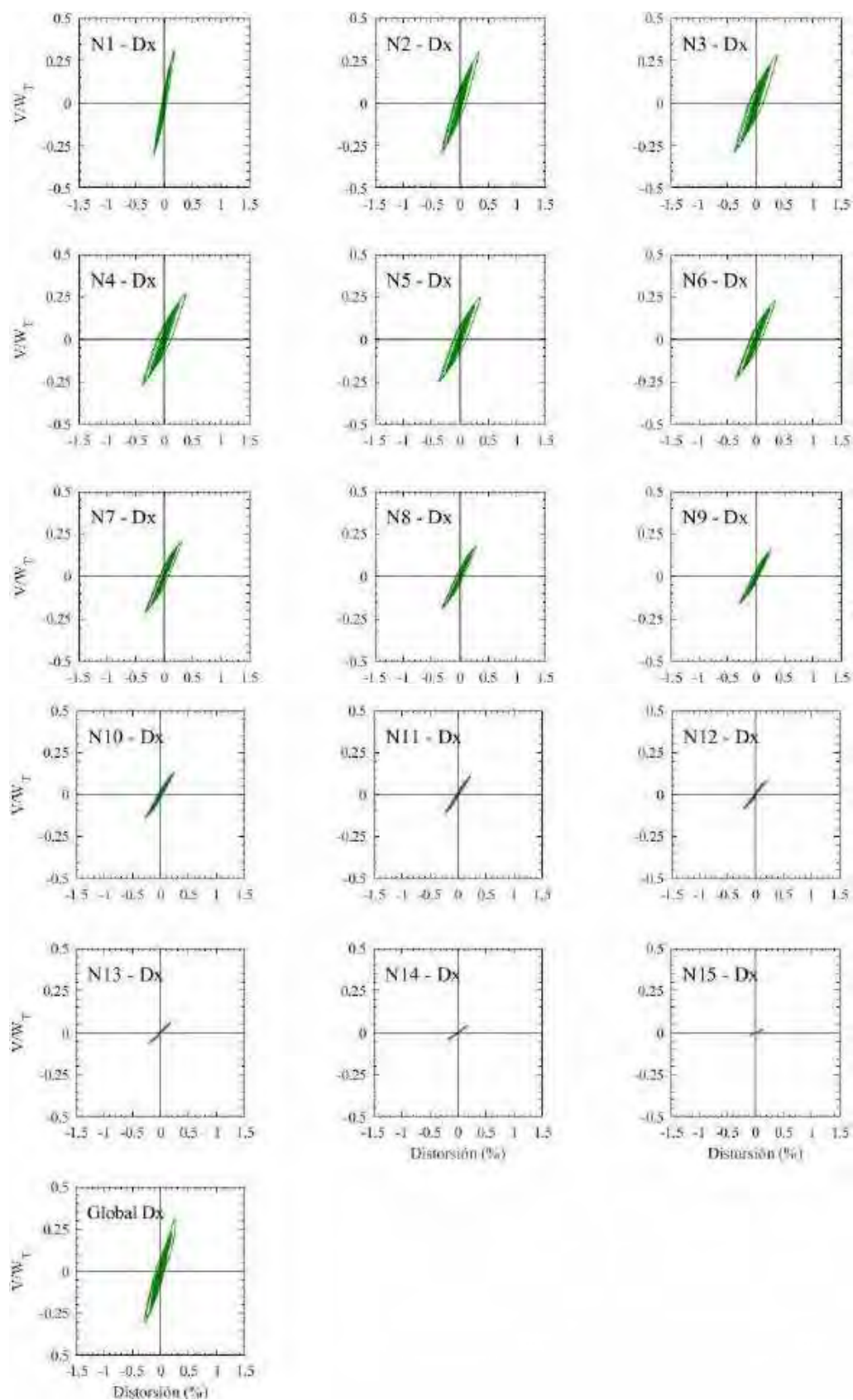


Figura G.44. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración CU80-B (2017)

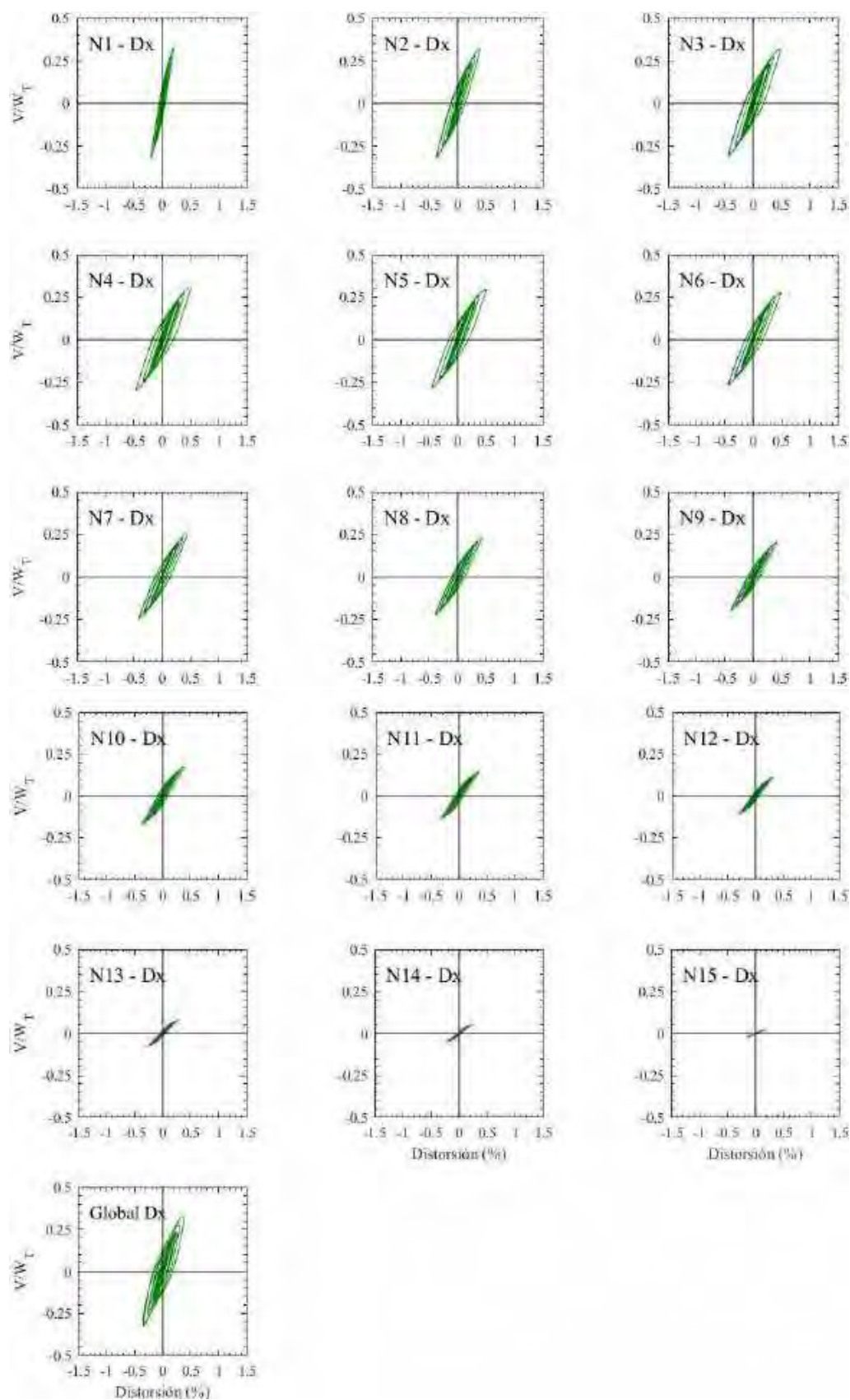


Figura G.45. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección x, registros de aceleración DX37-A (2017)

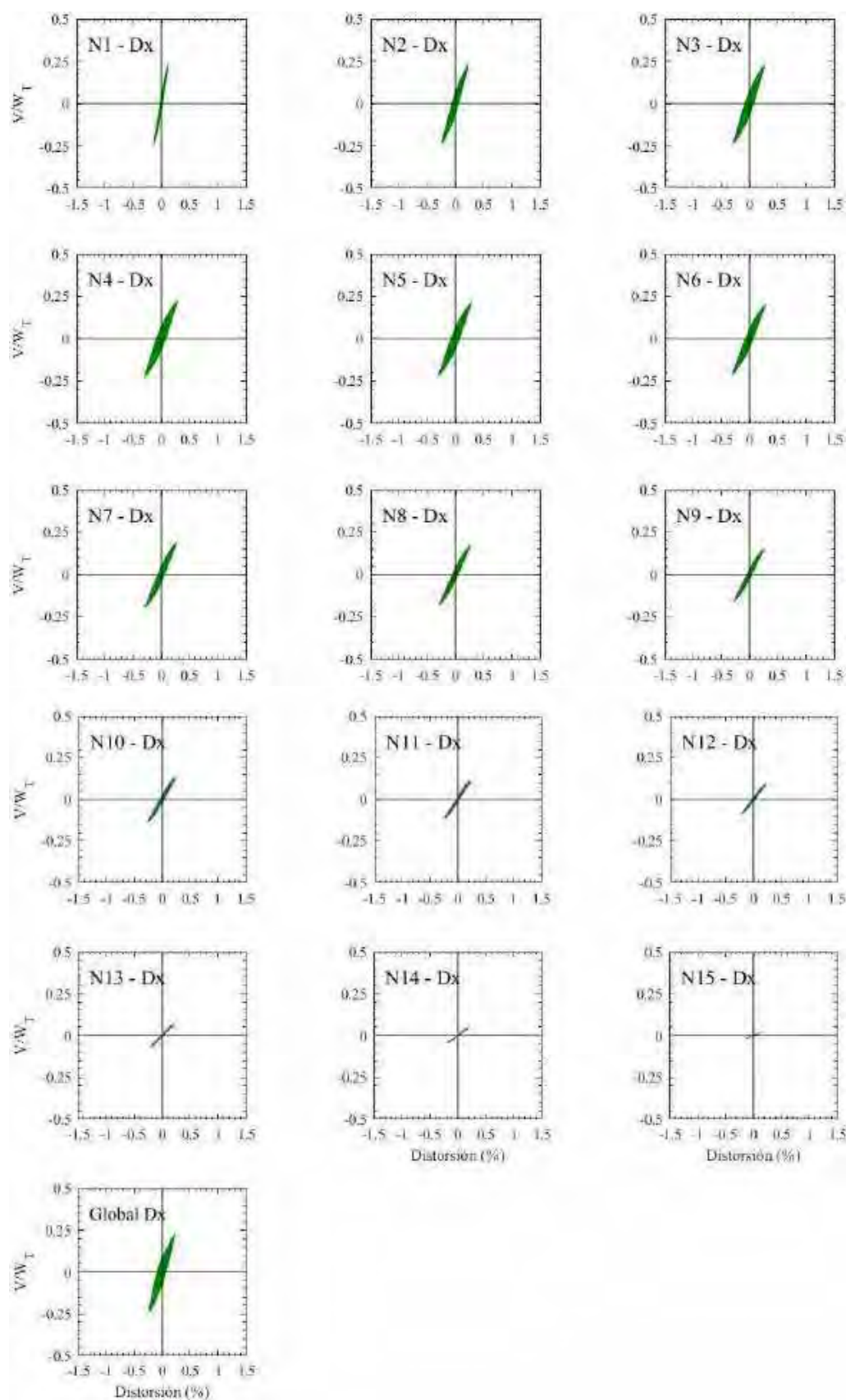


Figura G.46. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección x, registros de aceleración DX37-B (2017)

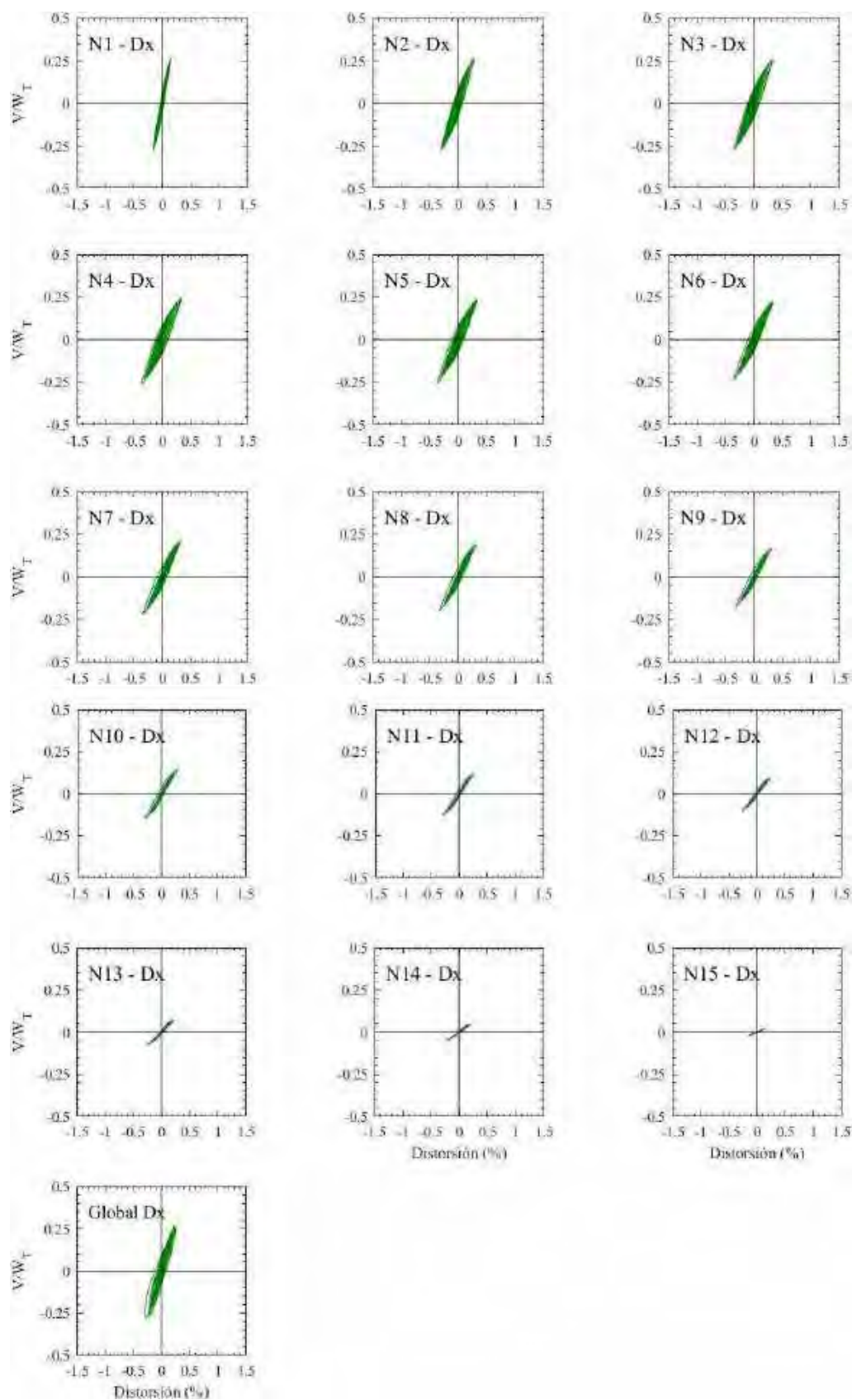


Figura G.47. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración JC54-A (2017)

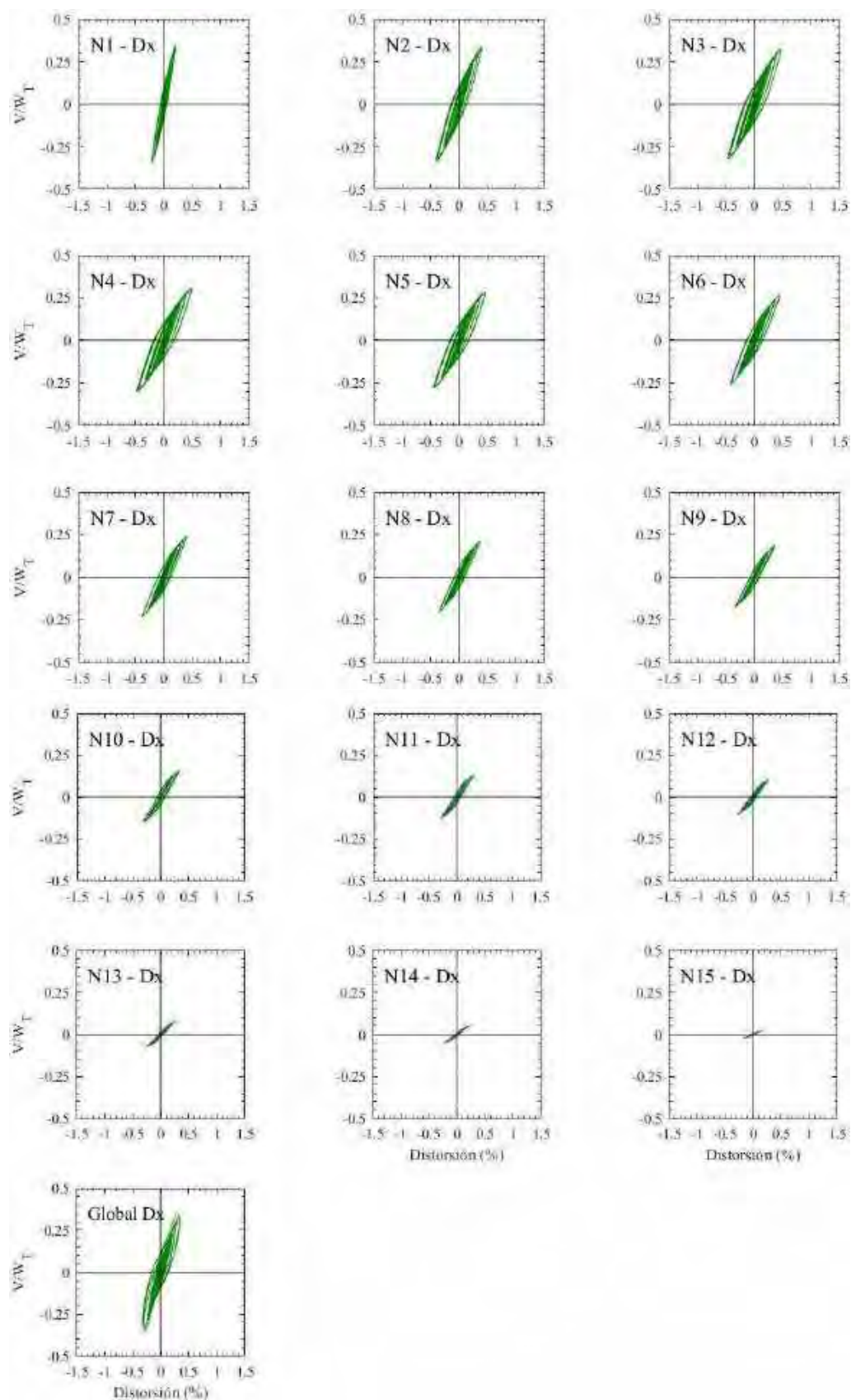


Figura G.48. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección x , registros de aceleración JC54-B (2017)

G.1.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y

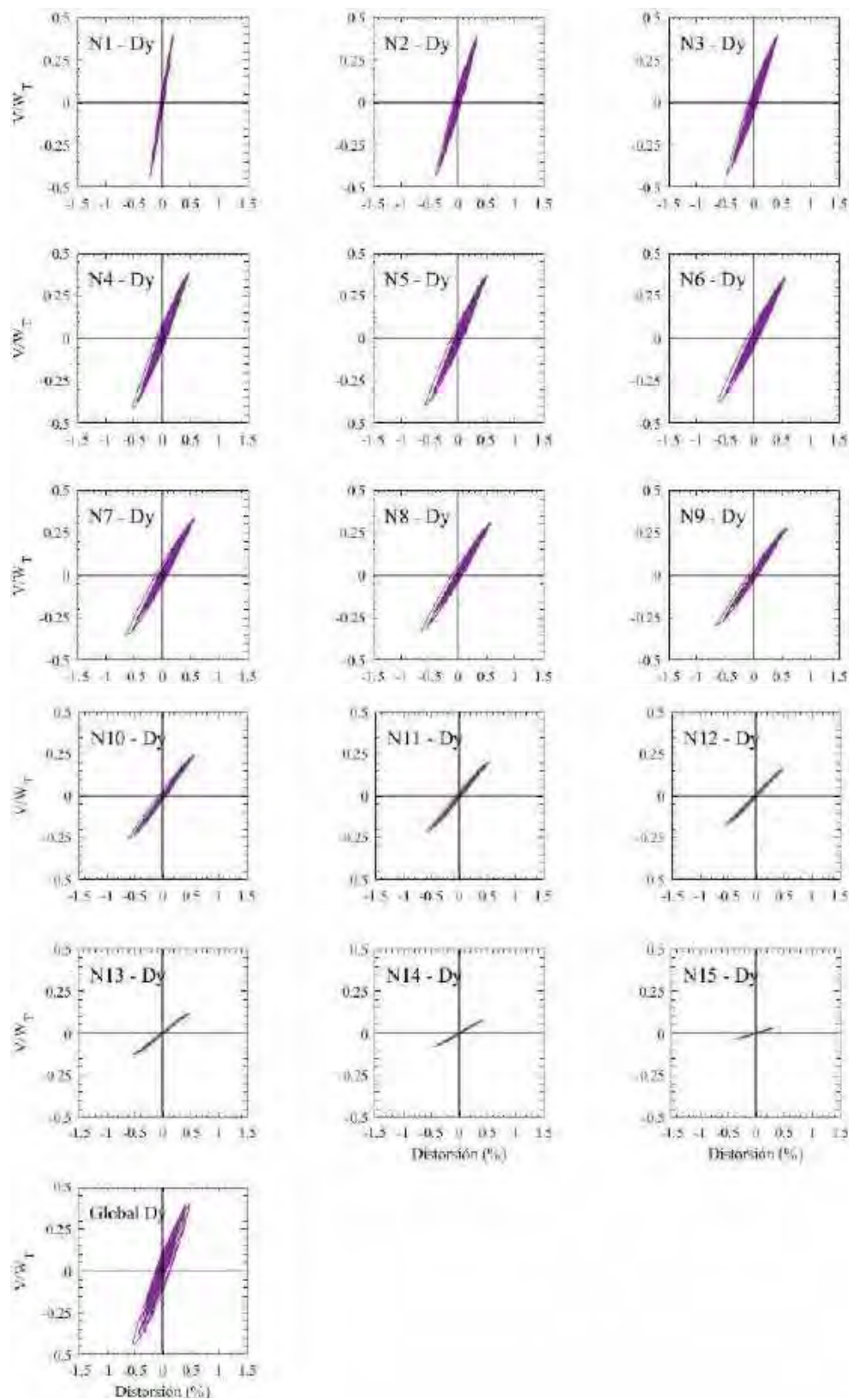


Figura G.49. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CM-A

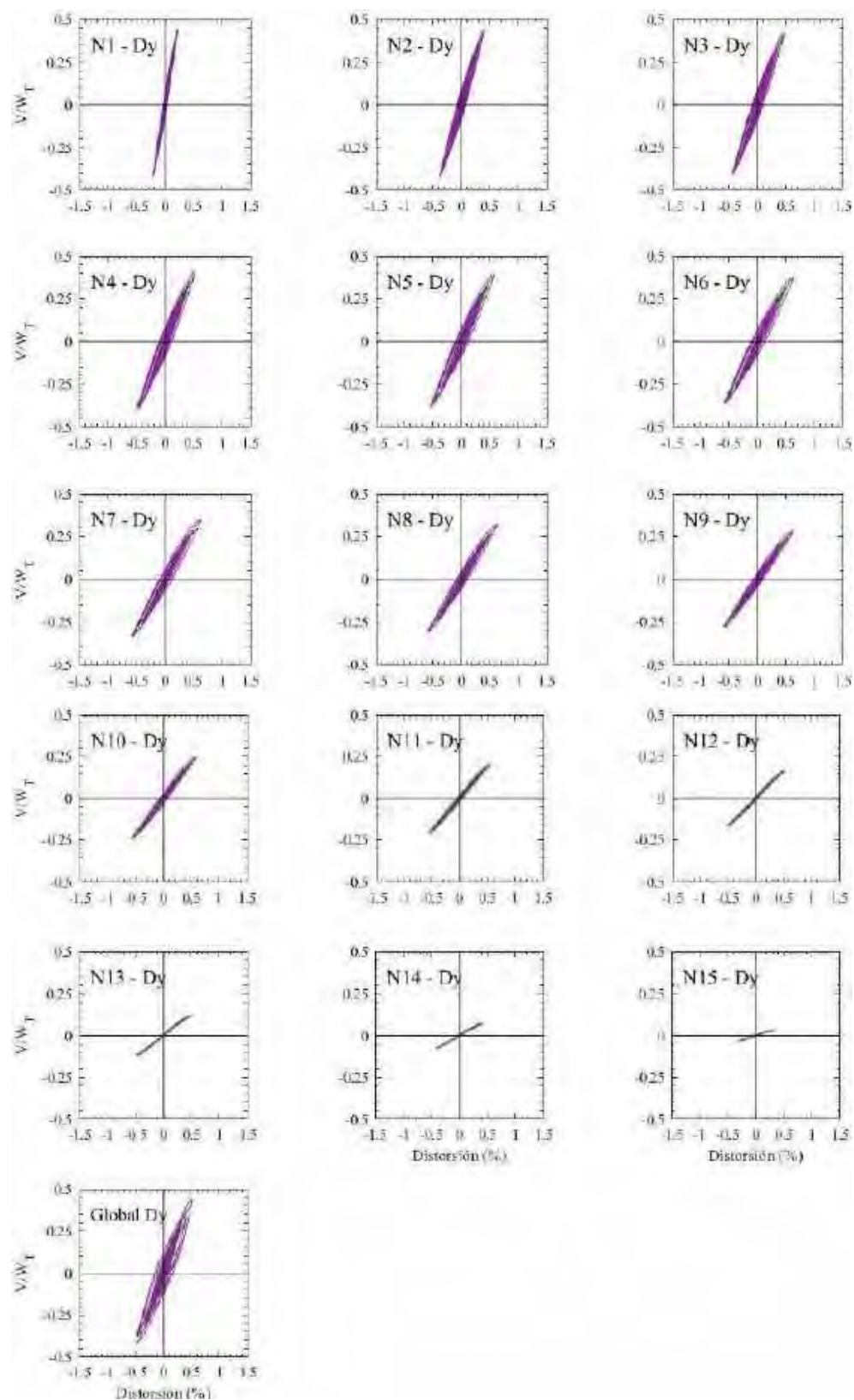


Figura G.50. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CM-B

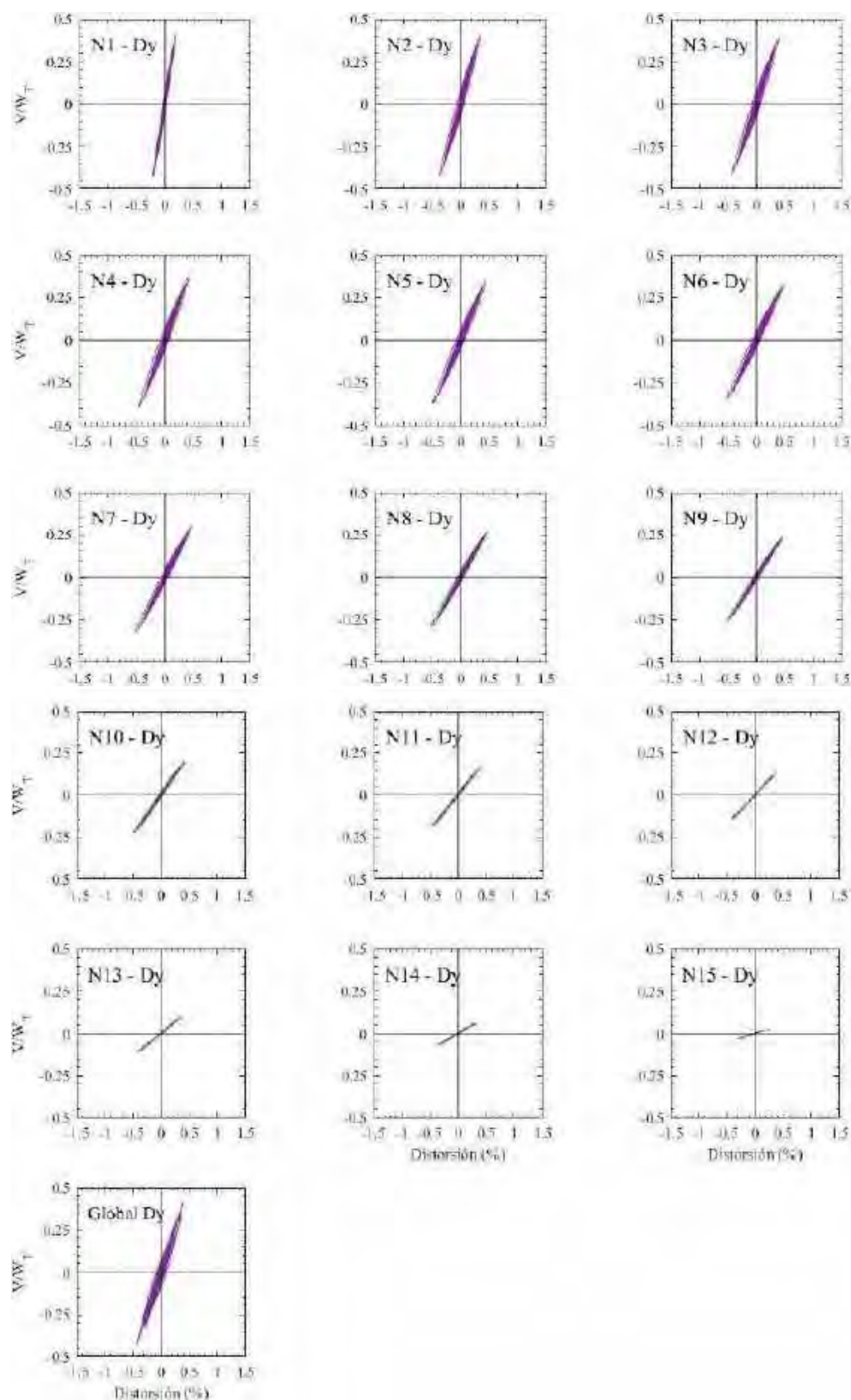


Figura G.51. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración DFRO-A

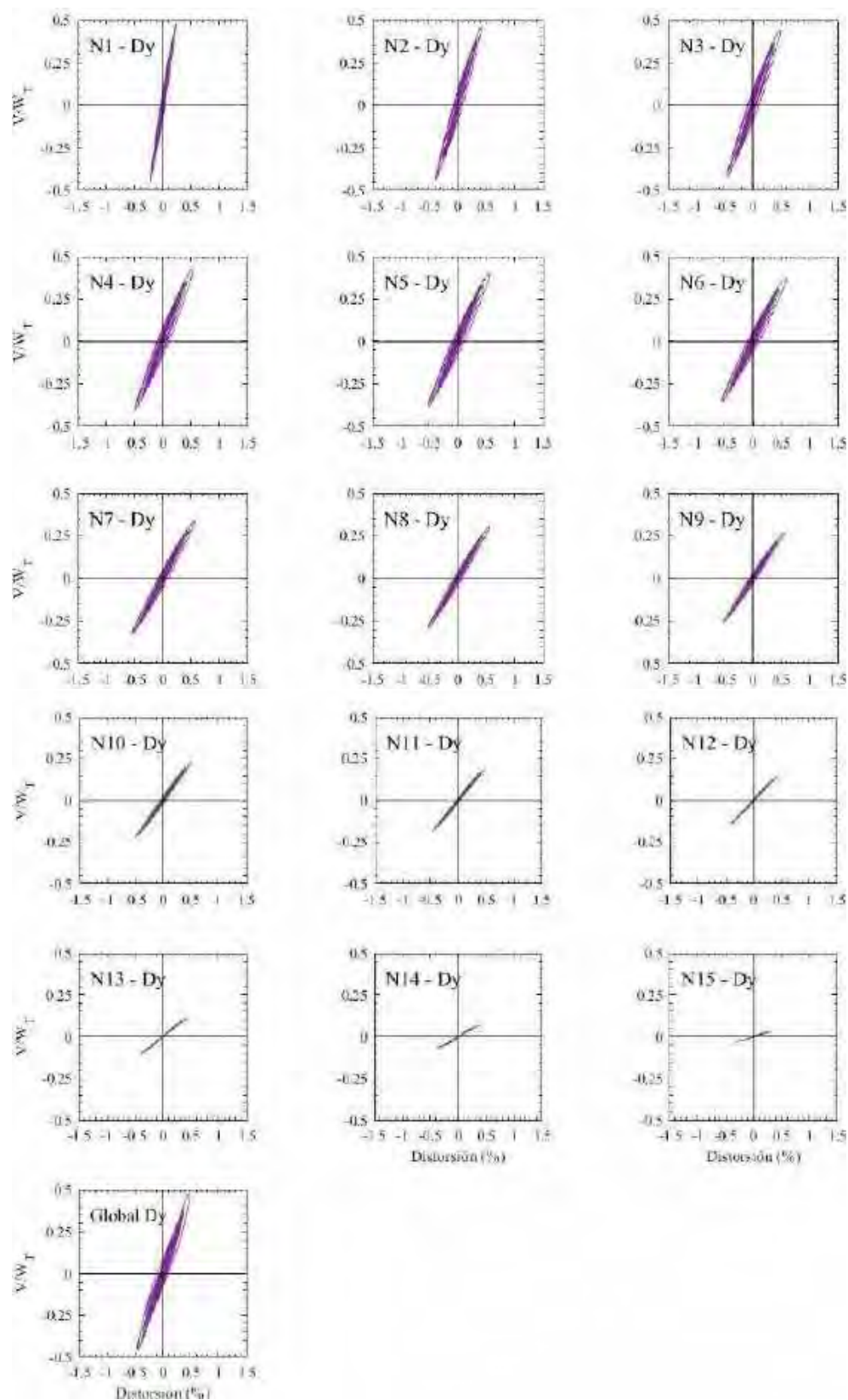


Figura G.52. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración DFRO –B

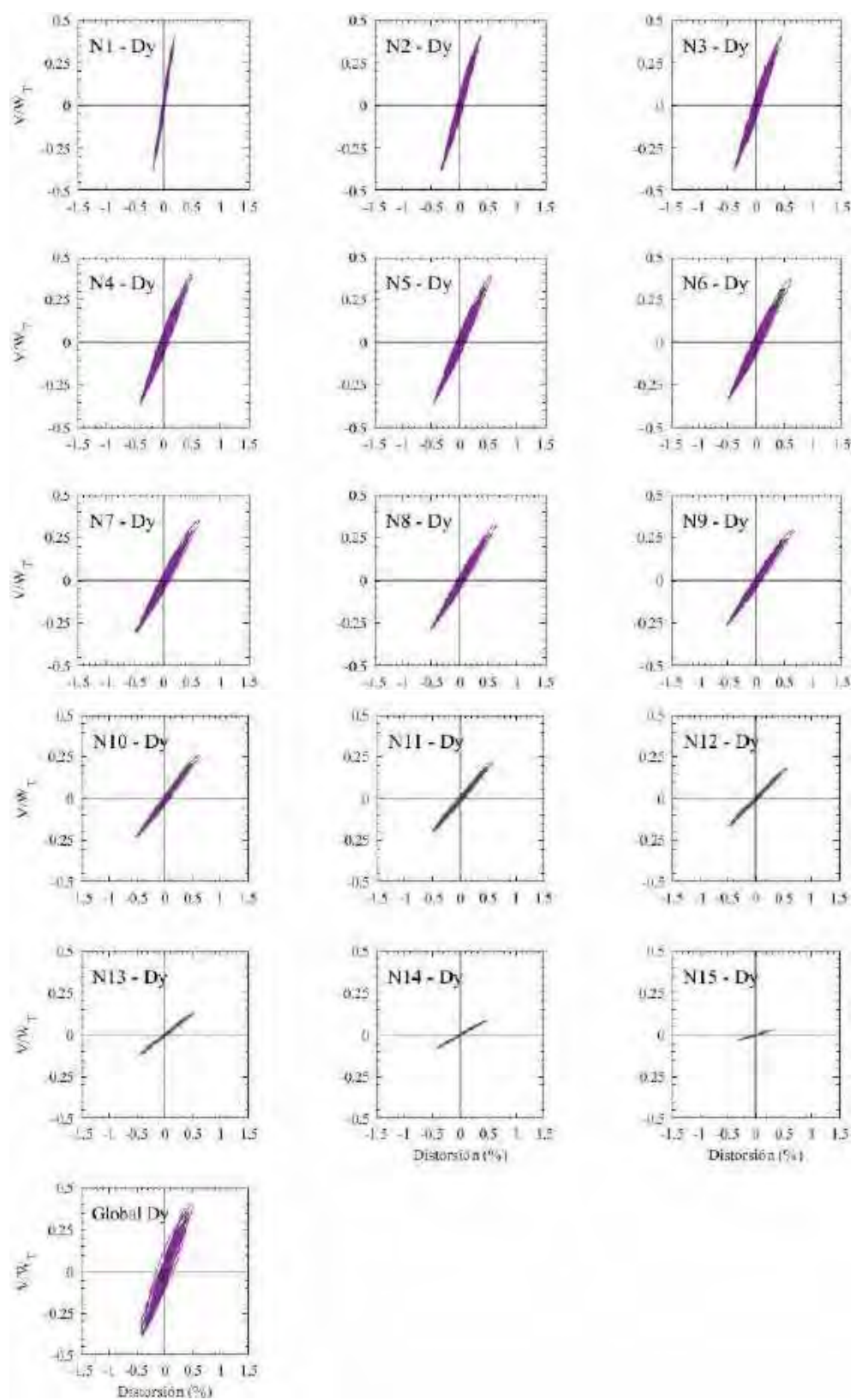


Figura G.53. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración IMSR-A

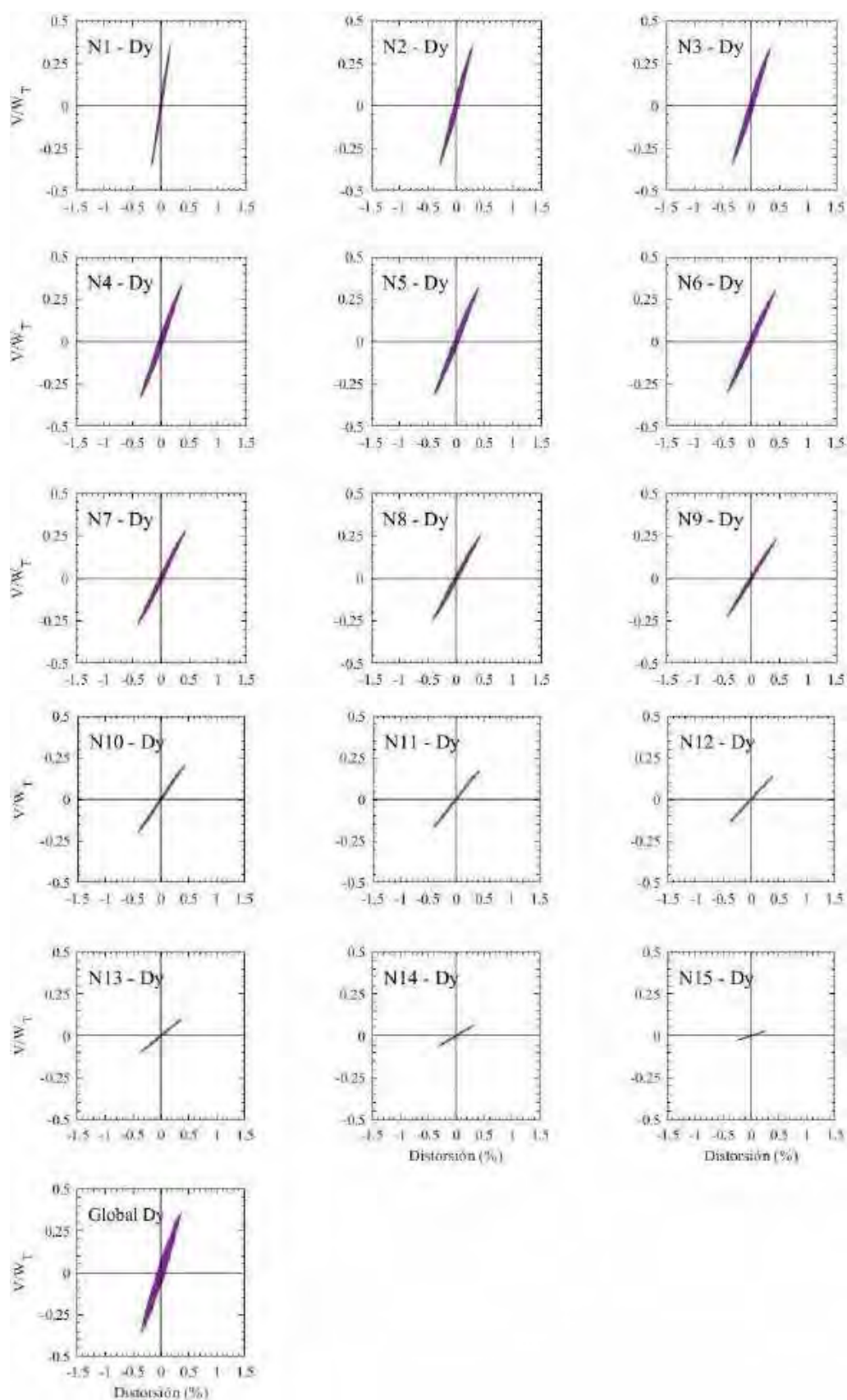


Figura G.54. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección y, registros de aceleración IMSR –B

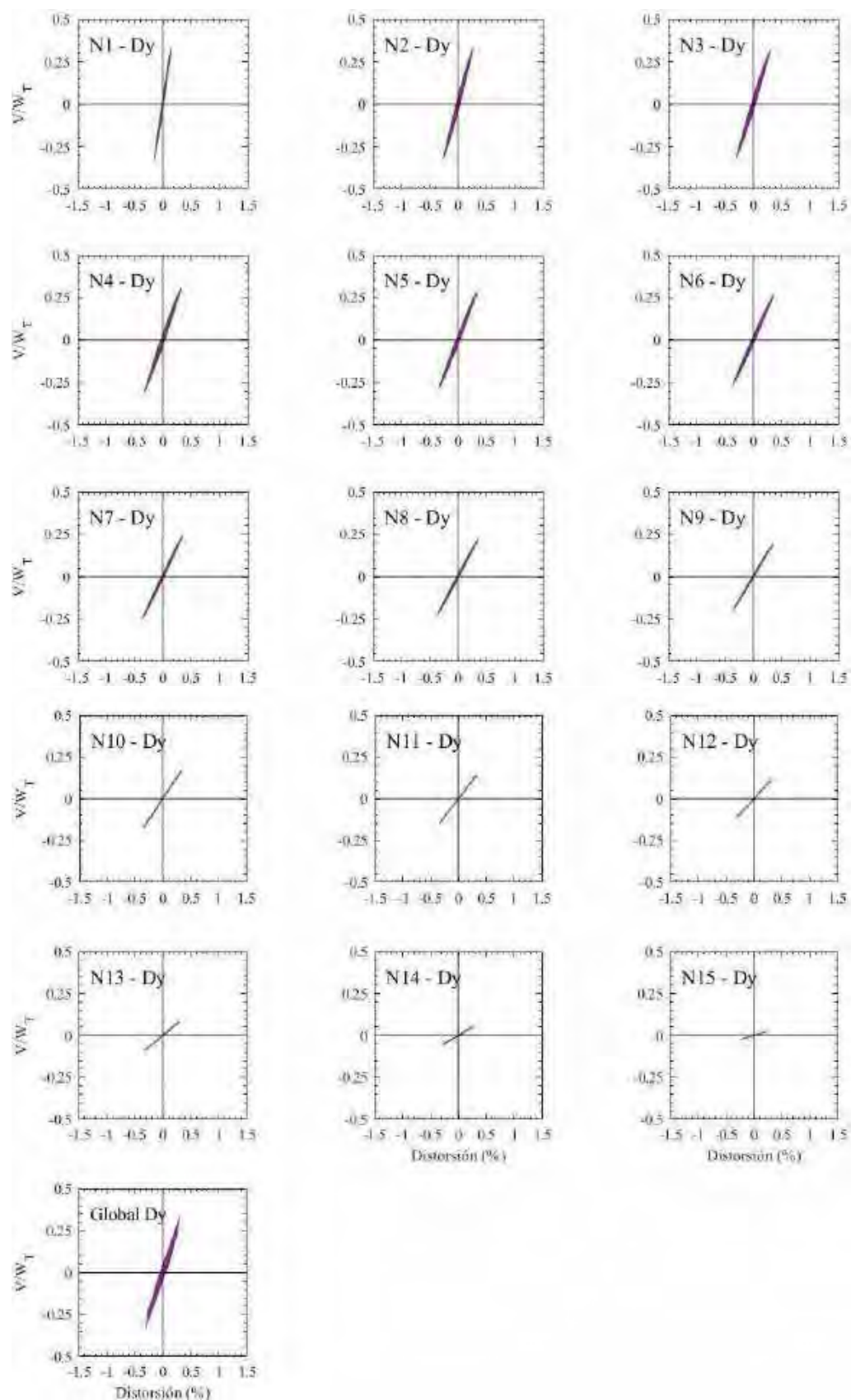


Figura G.55. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración SMR-A

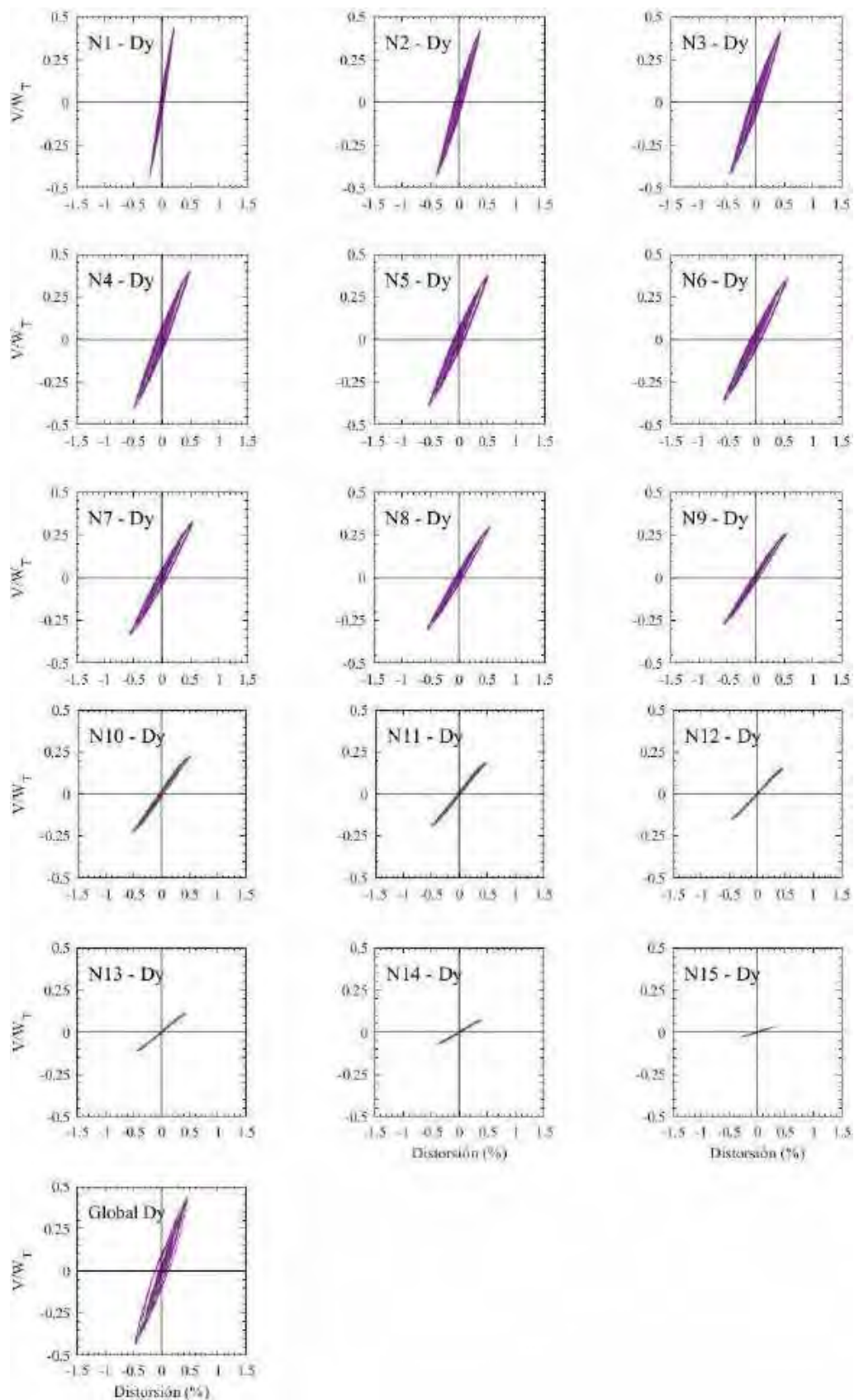


Figura G.56. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración SMR –B

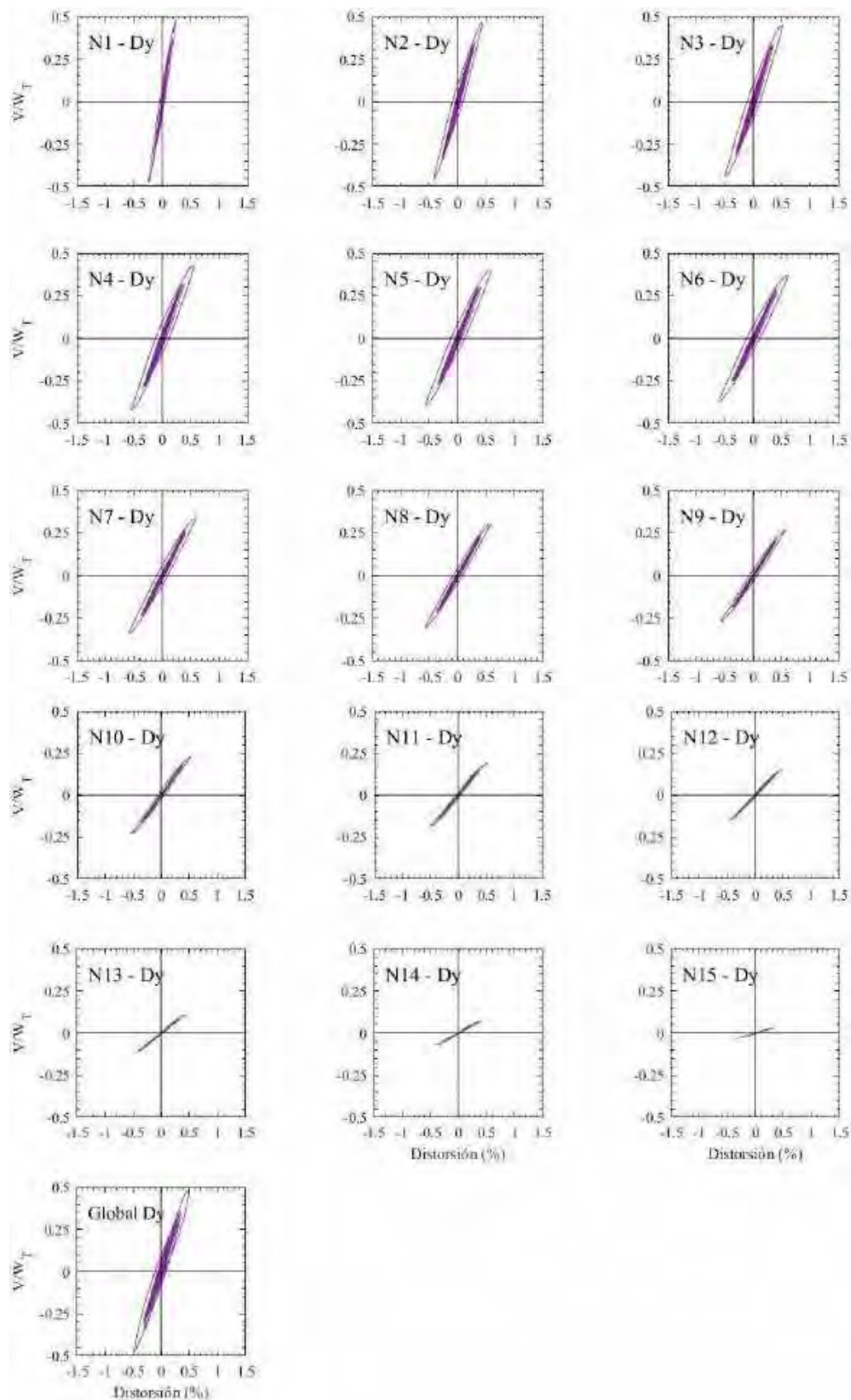


Figura G.57. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración MI15-A

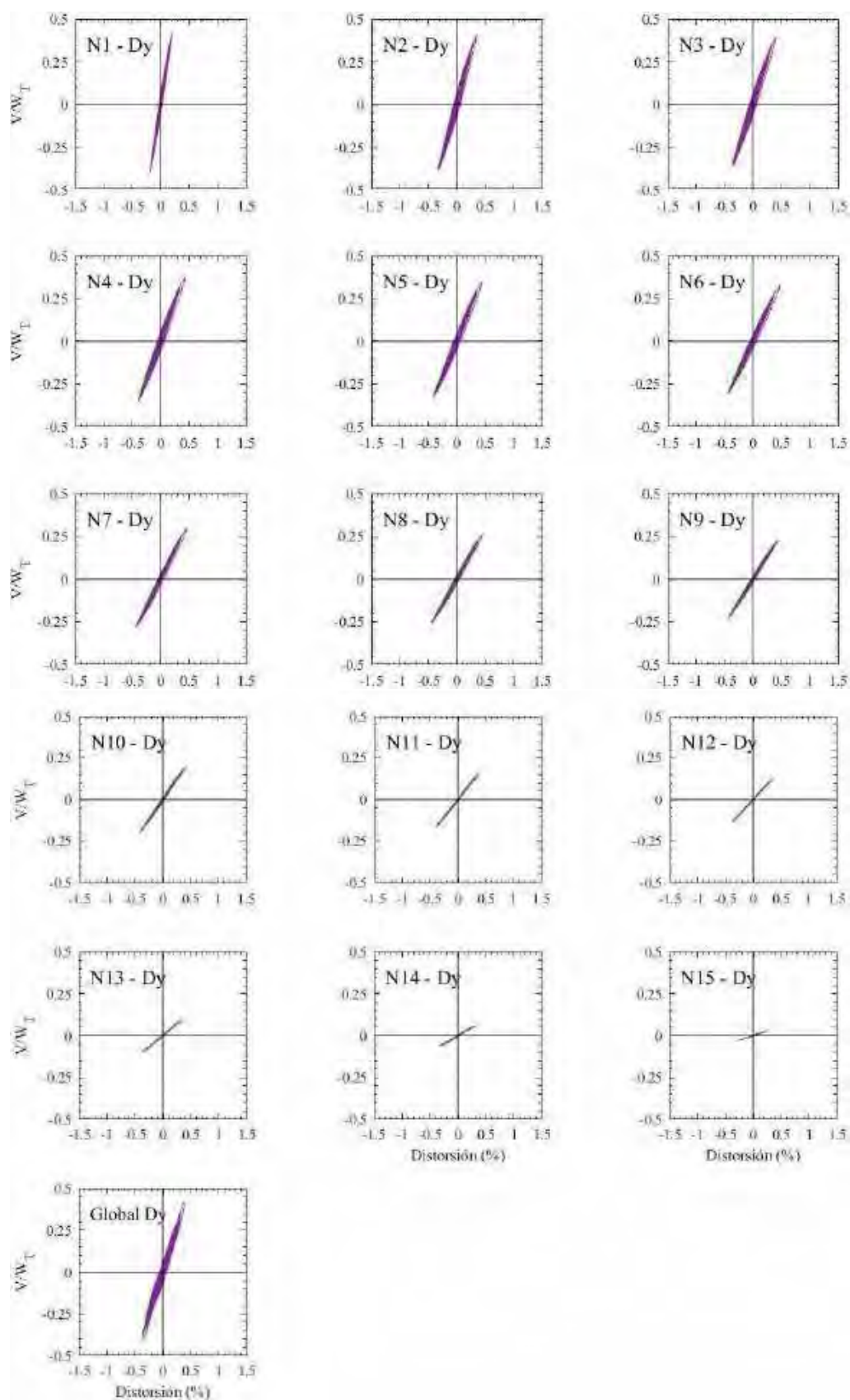


Figura G.58. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración MI15-B

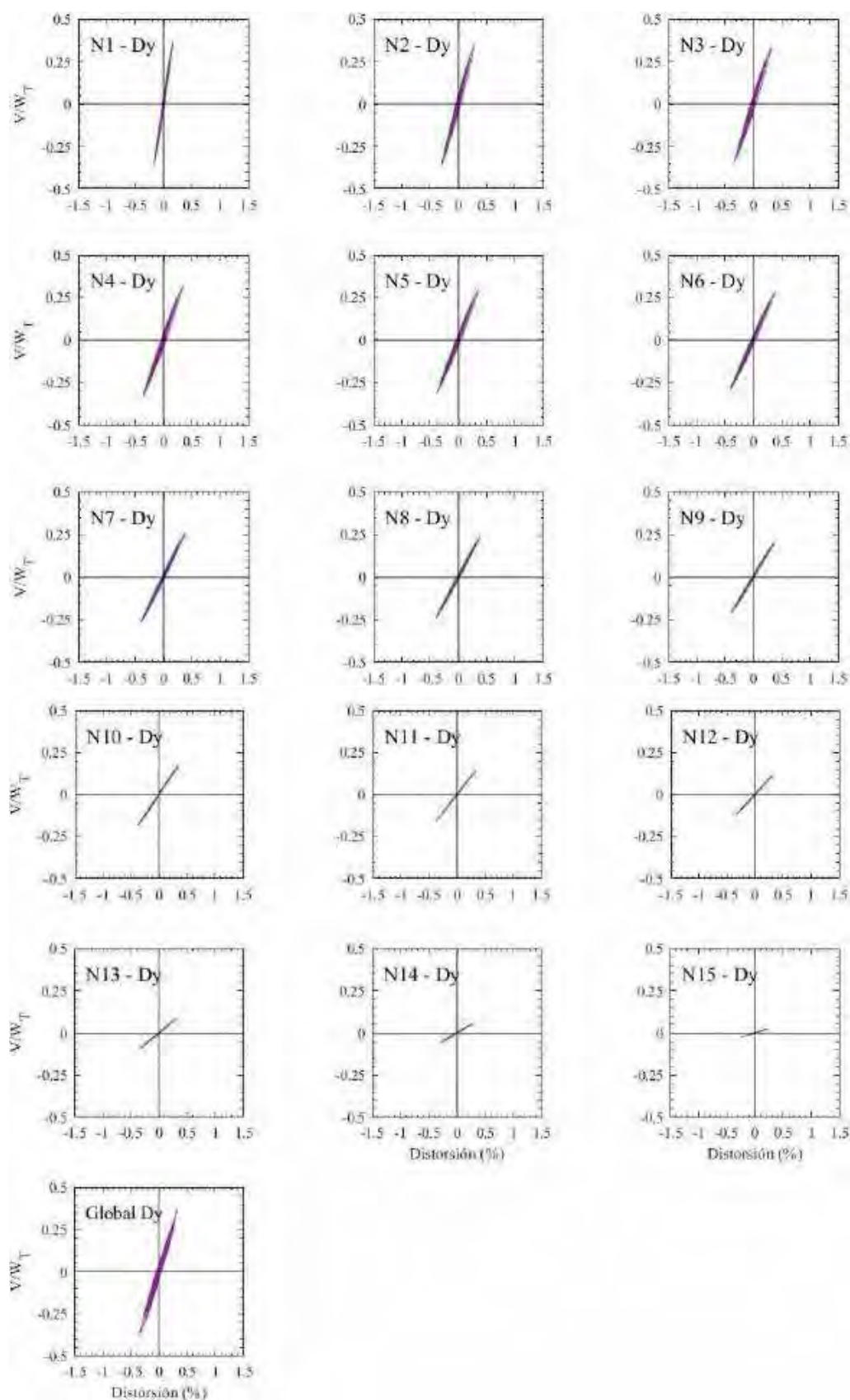


Figura G.59. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CU80-A (2017)

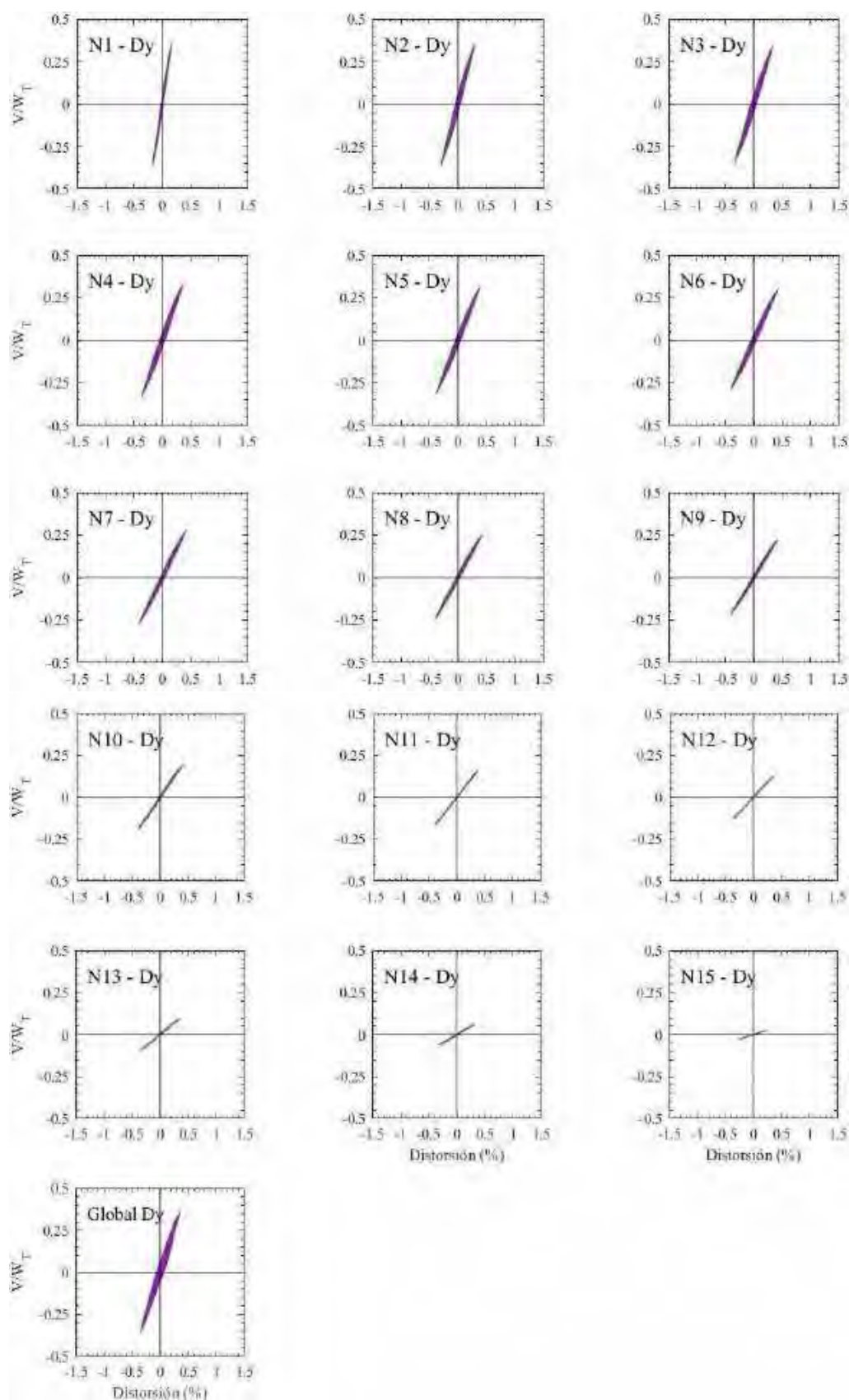


Figura G.60. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección y, registros de aceleración CU80-B (2017)

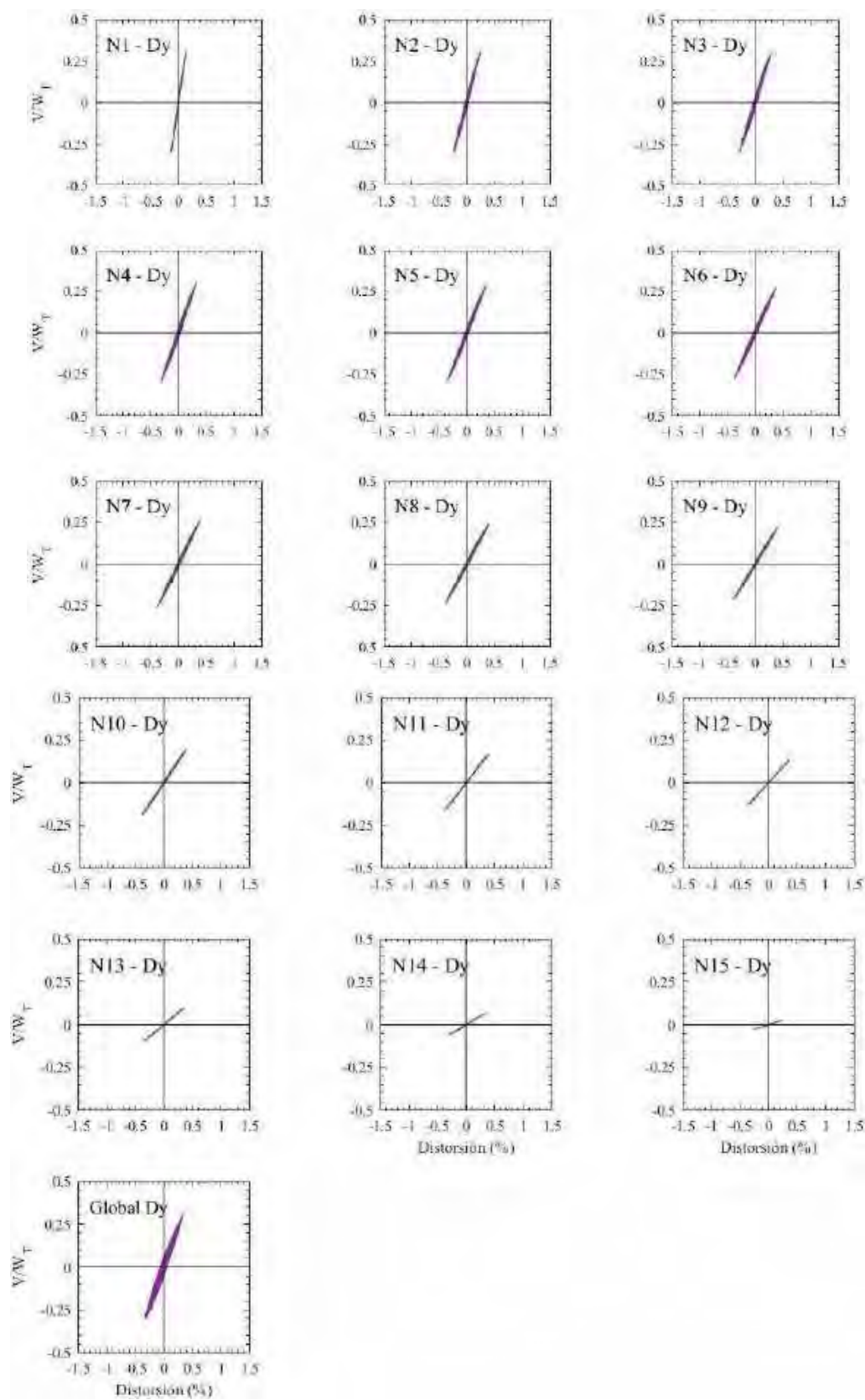


Figura G.61. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración DX37-A (2017)

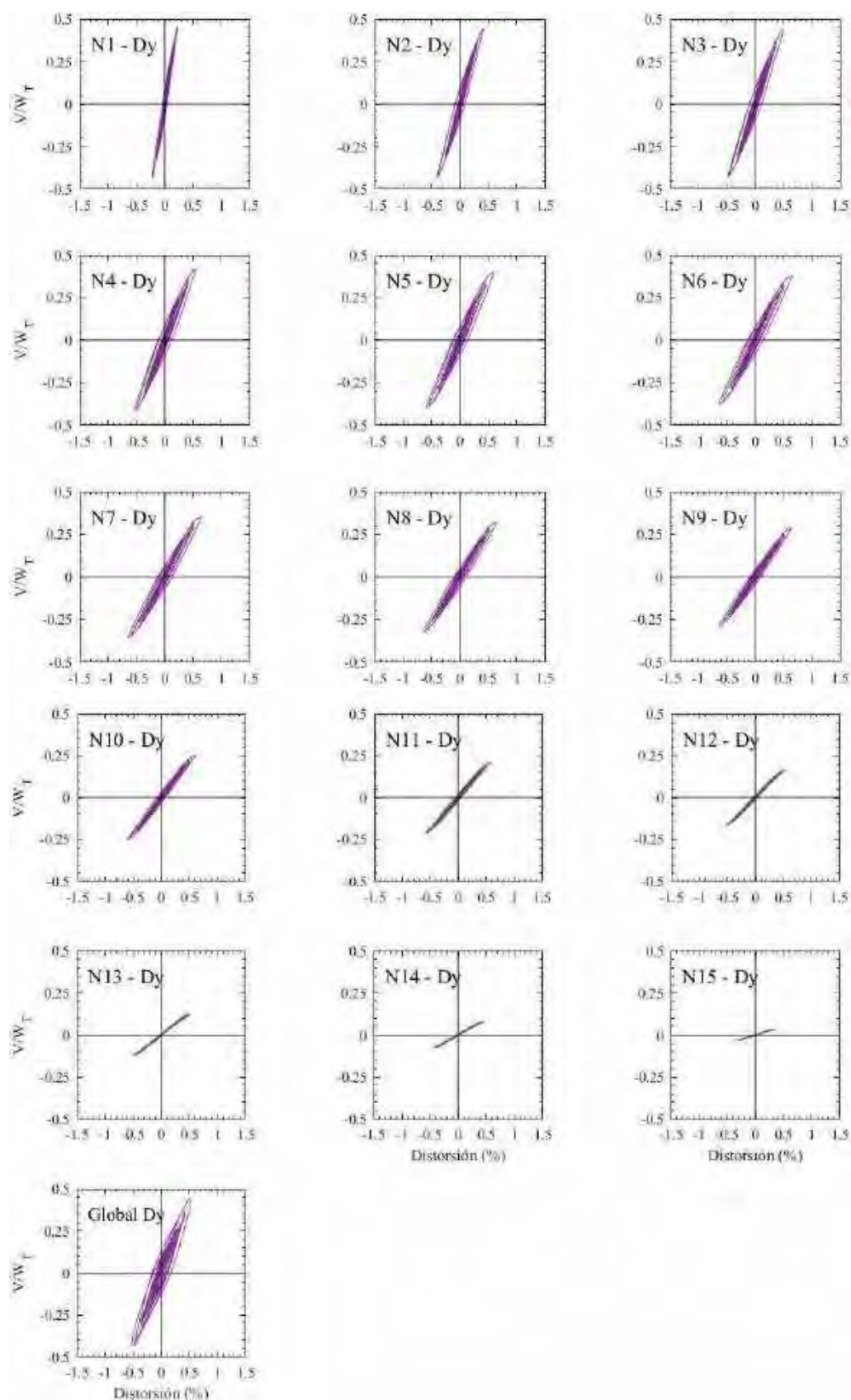


Figura G.62. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección y, registros de aceleración DX37-B (2017)

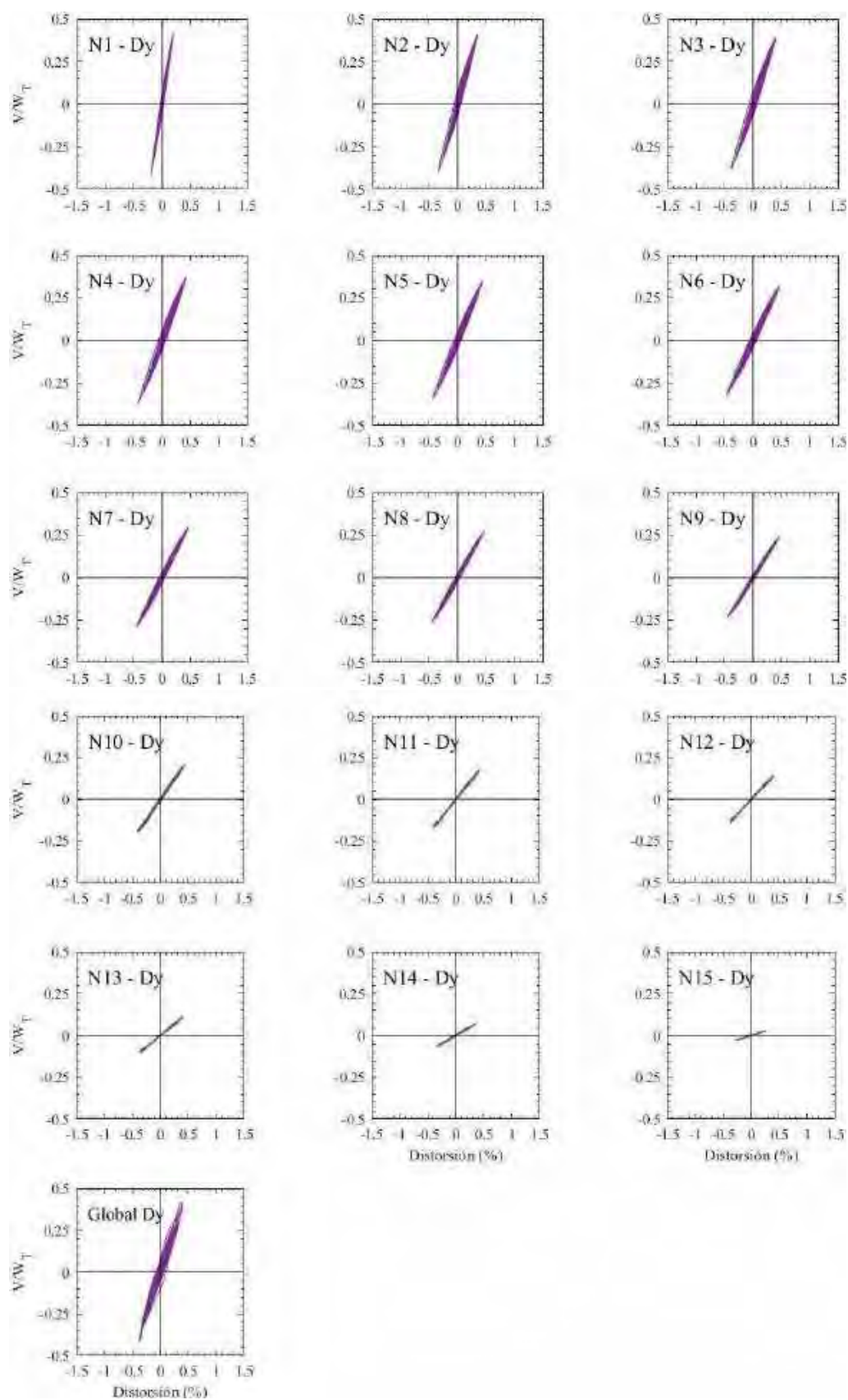


Figura G.63. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección y, registros de aceleración JC54-A (2017)

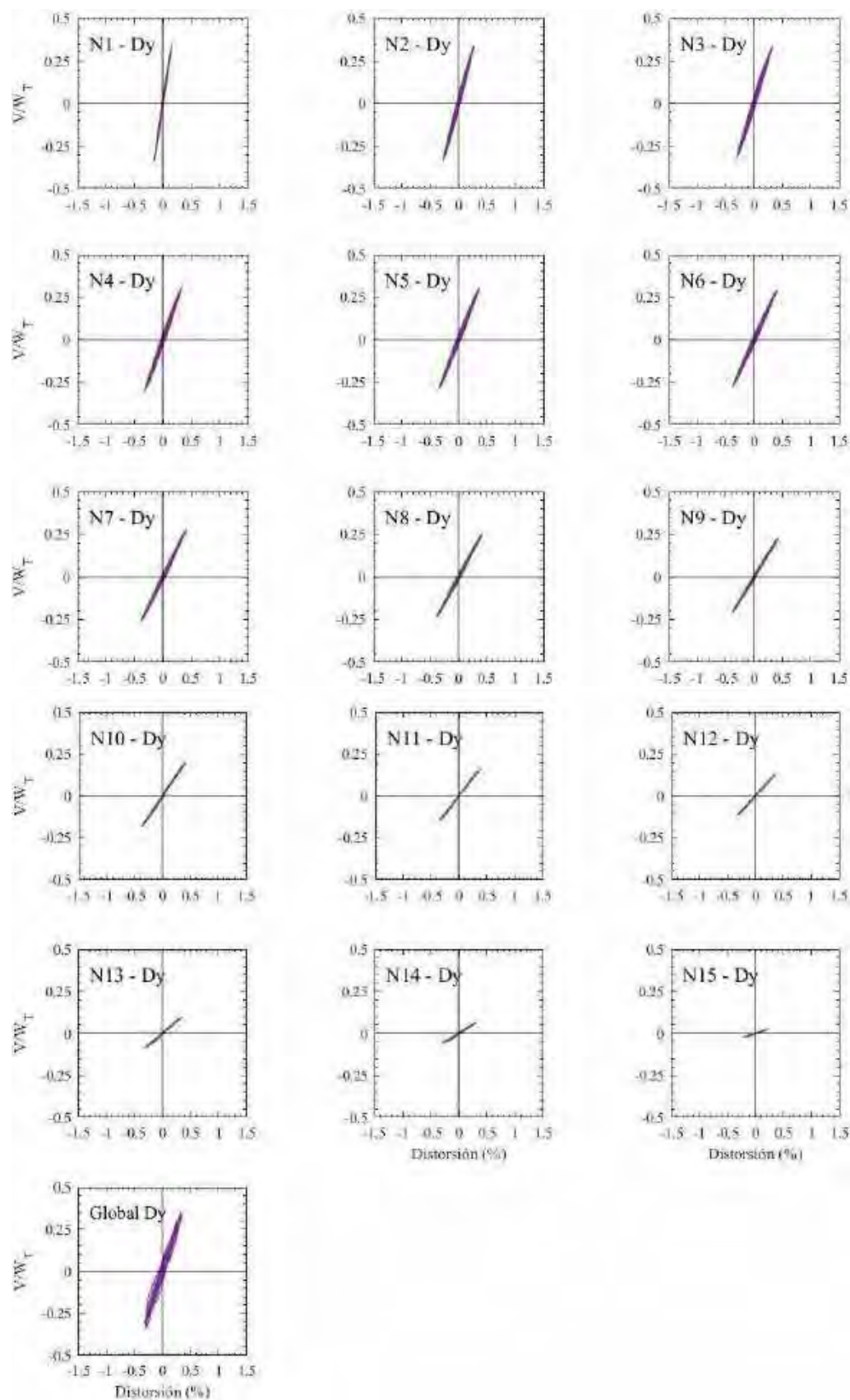
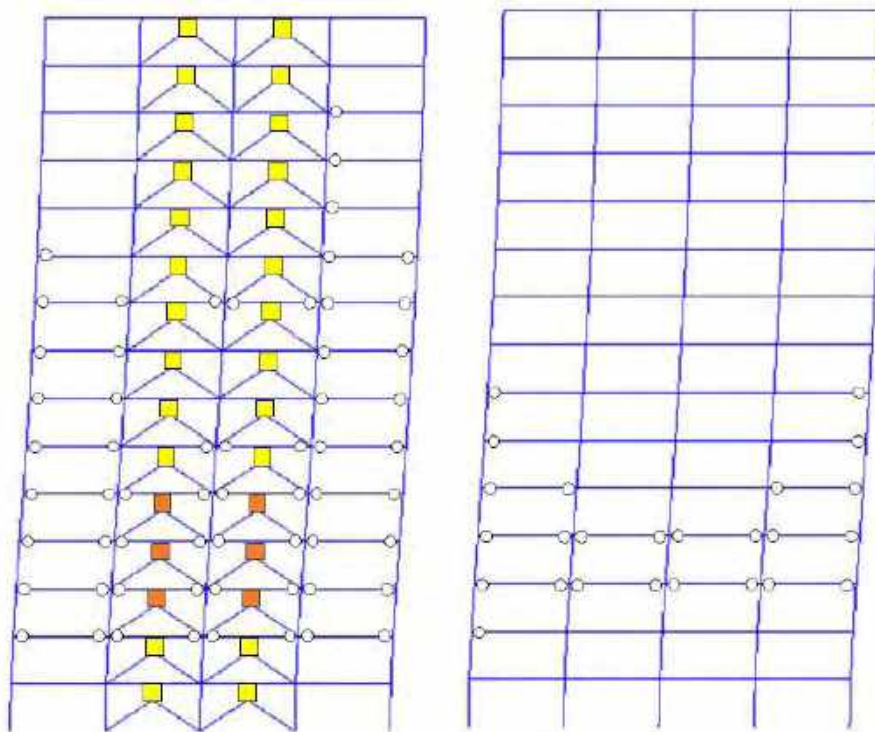


Figura G.64. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección y, registros de aceleración JC54-B (2017)

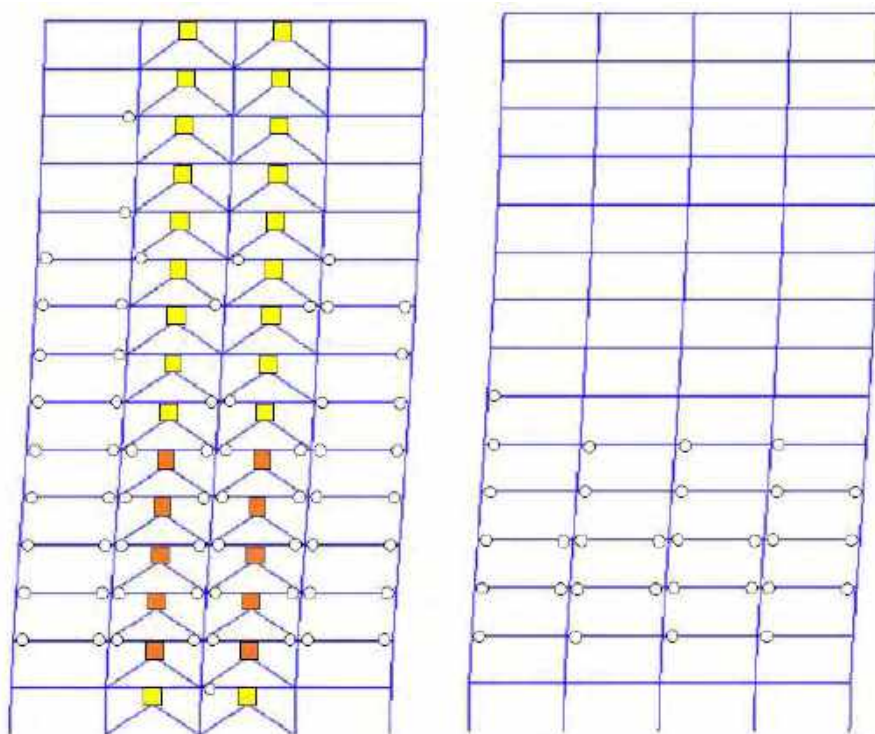
G.1.5 Mapeos de fluencia en dirección x



a) Marco perimetral

b) Marco interior

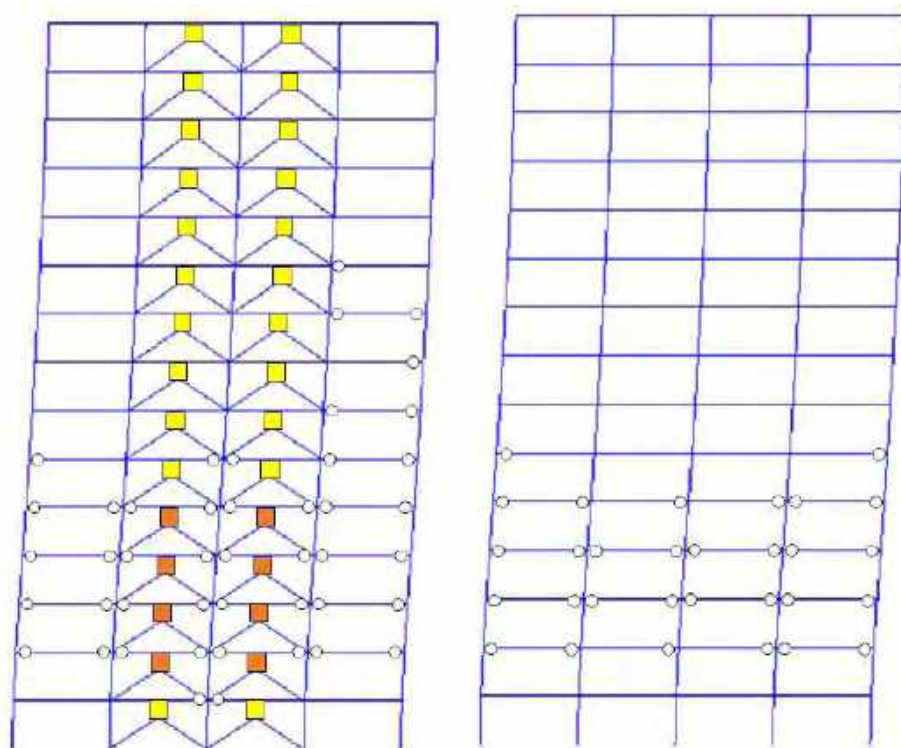
Figura G.65. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CM-A



a) Marco perimetral

b) Marco interior

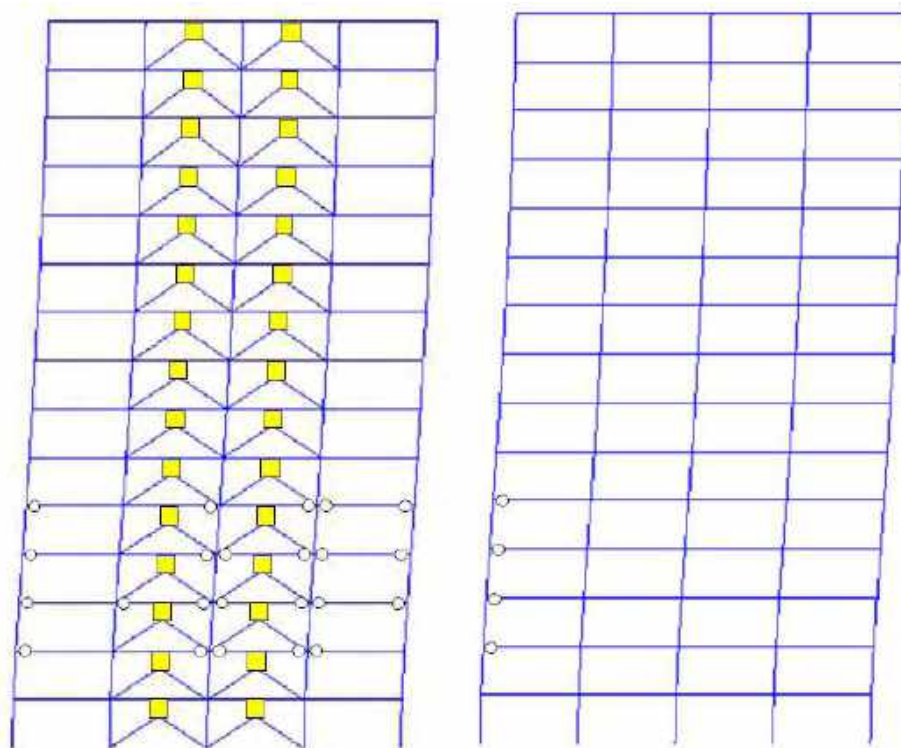
Figura G.66. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CM-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura G.67. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DFRO-A



a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura G.68. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DFRO –B

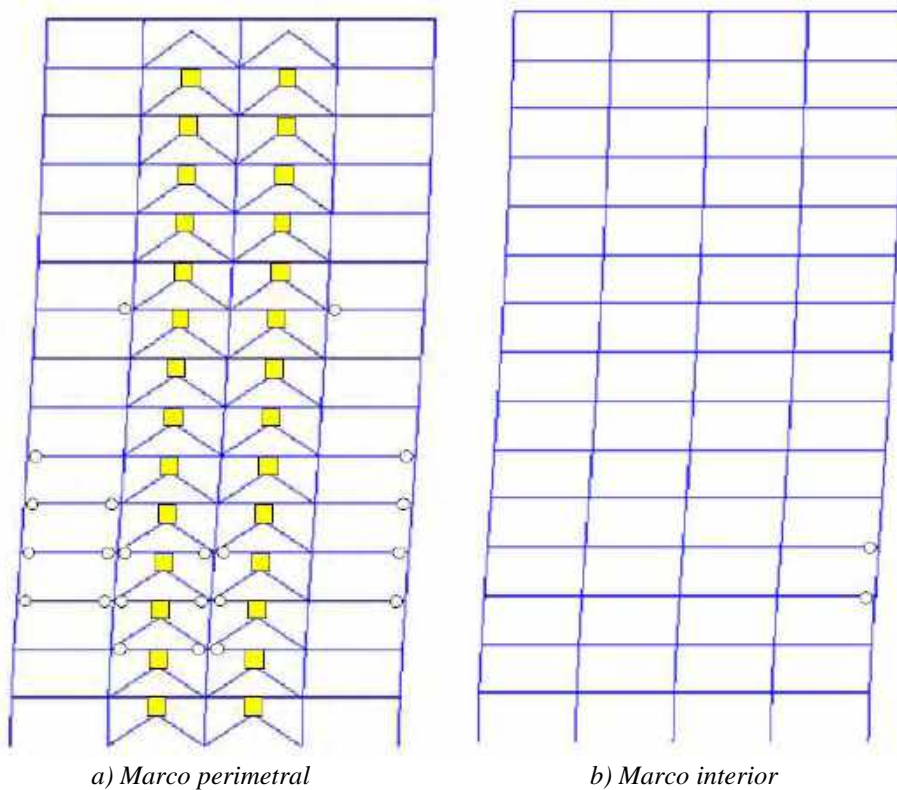


Figura G.69. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración IMSR-A

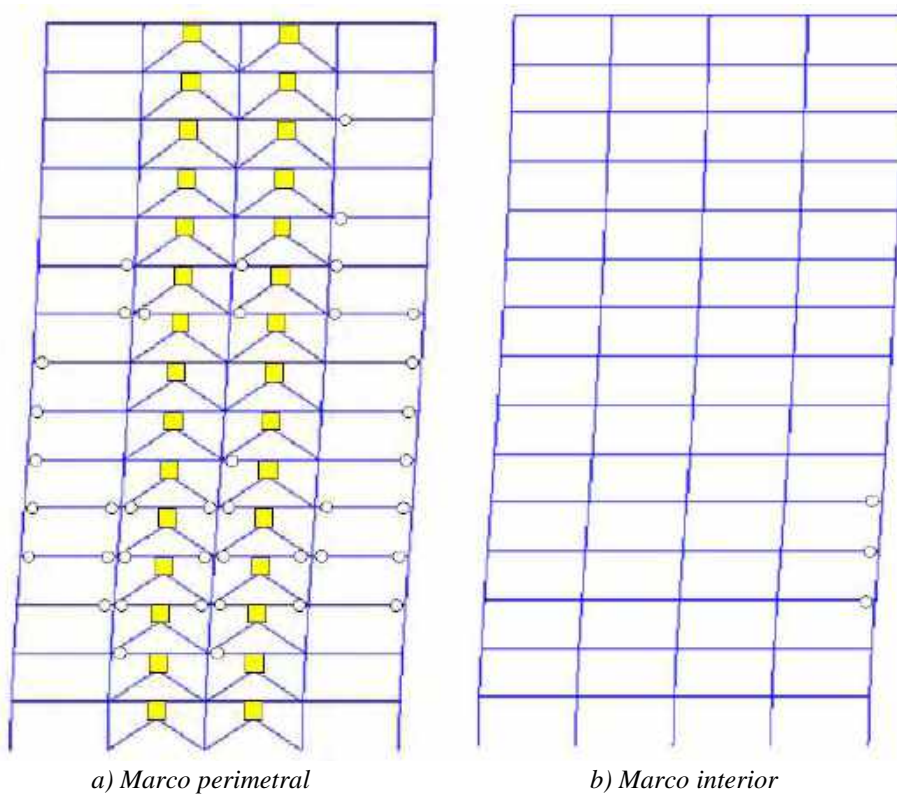
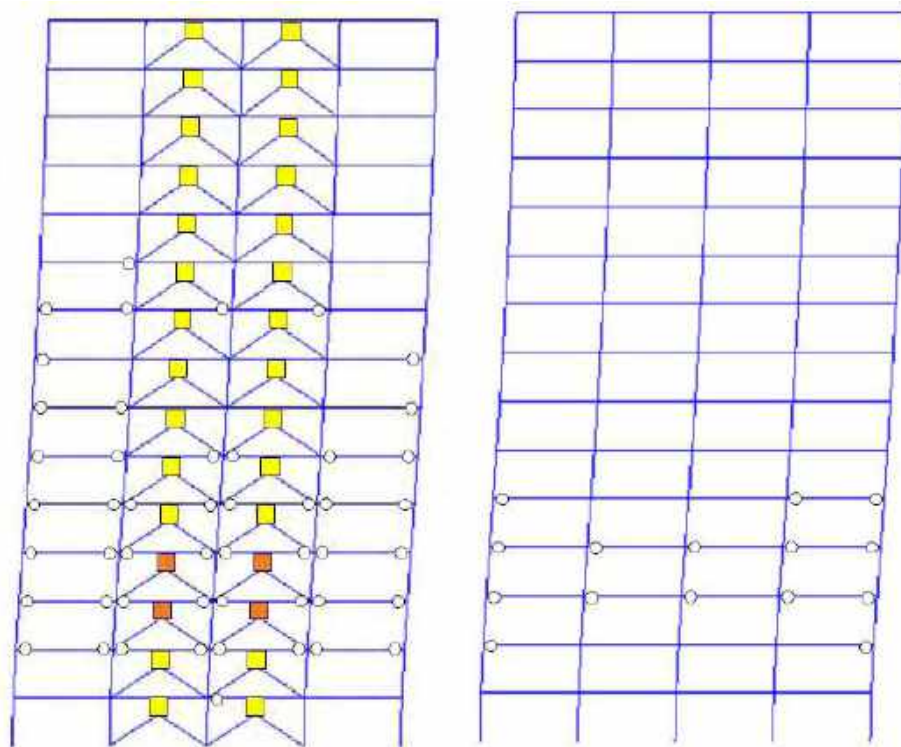
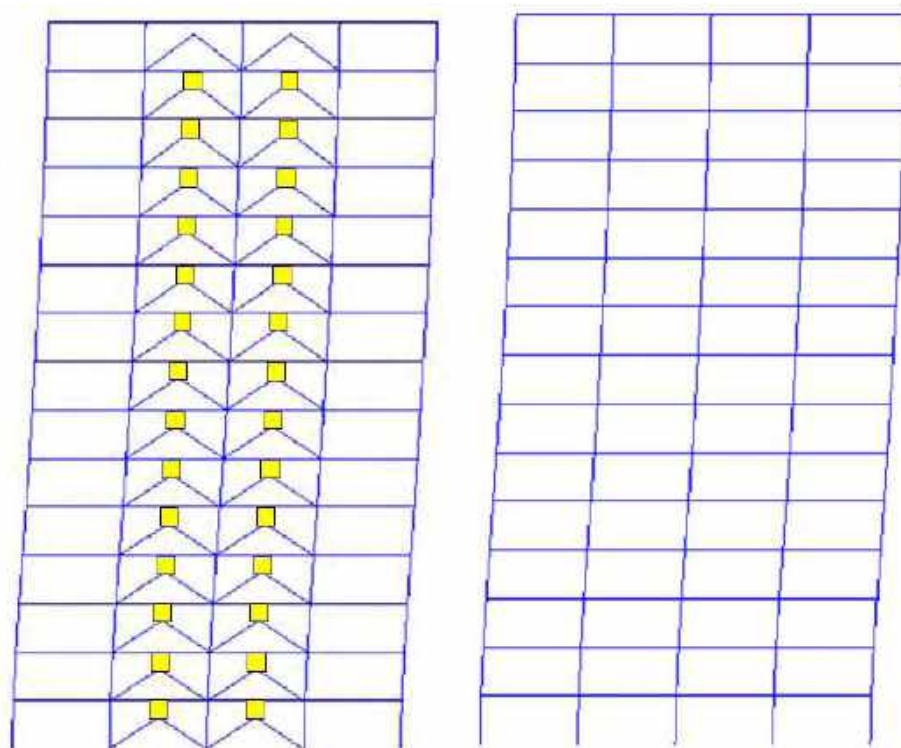


Figura G.70. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración IMSR –B



a) Marco perimetral
b) Marco interior
Figura G.71. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SMR-A



a) Marco perimetral
b) Marco interior
Figura G.72. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SMR -B

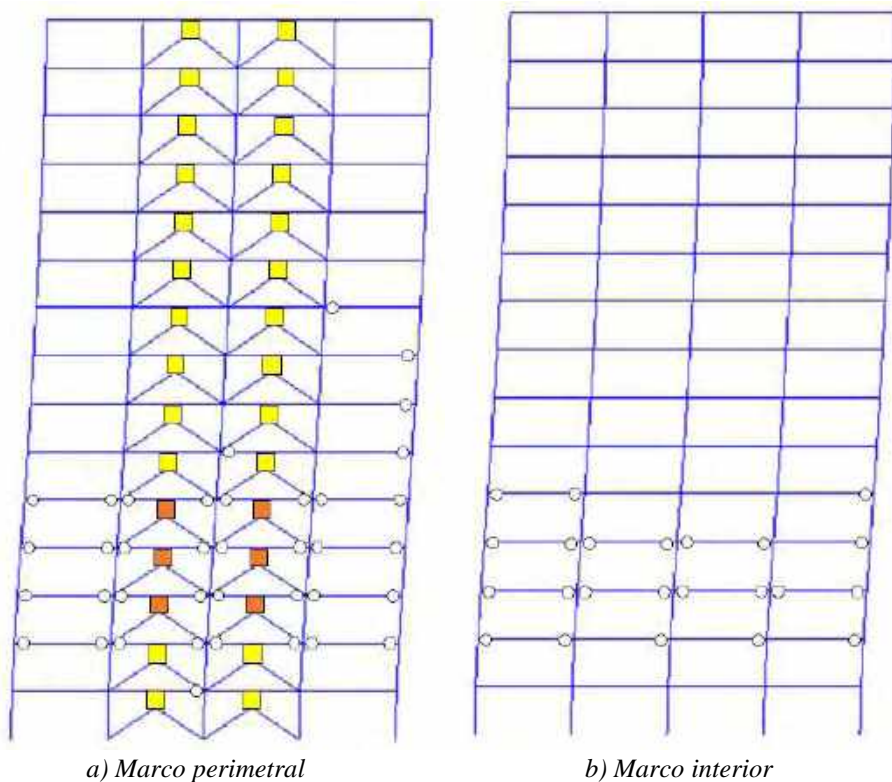


Figura G.73. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-A

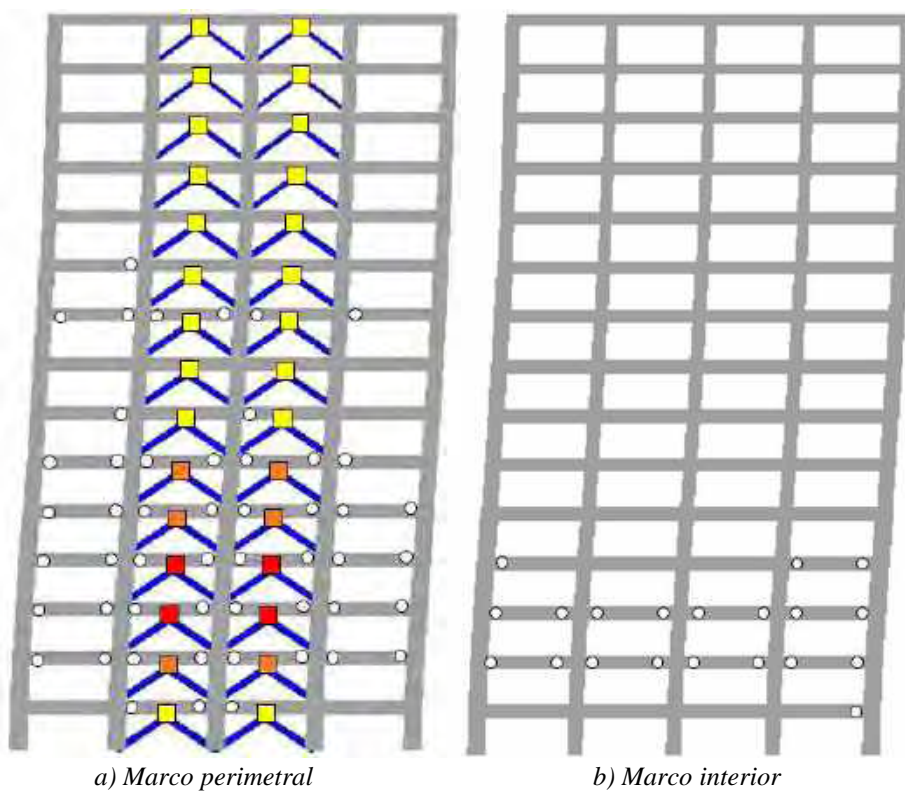
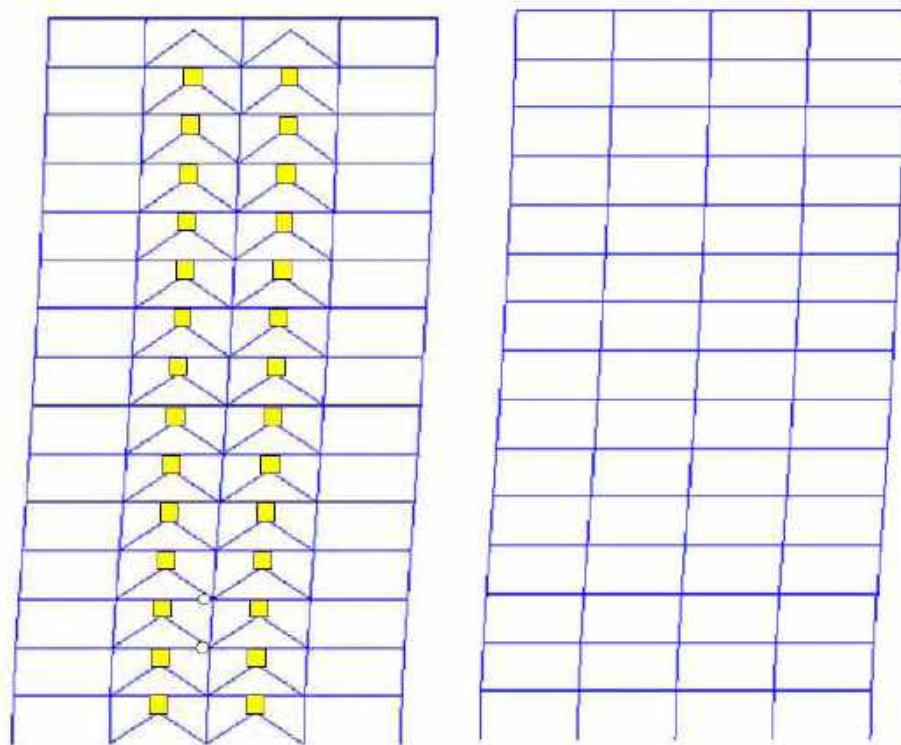


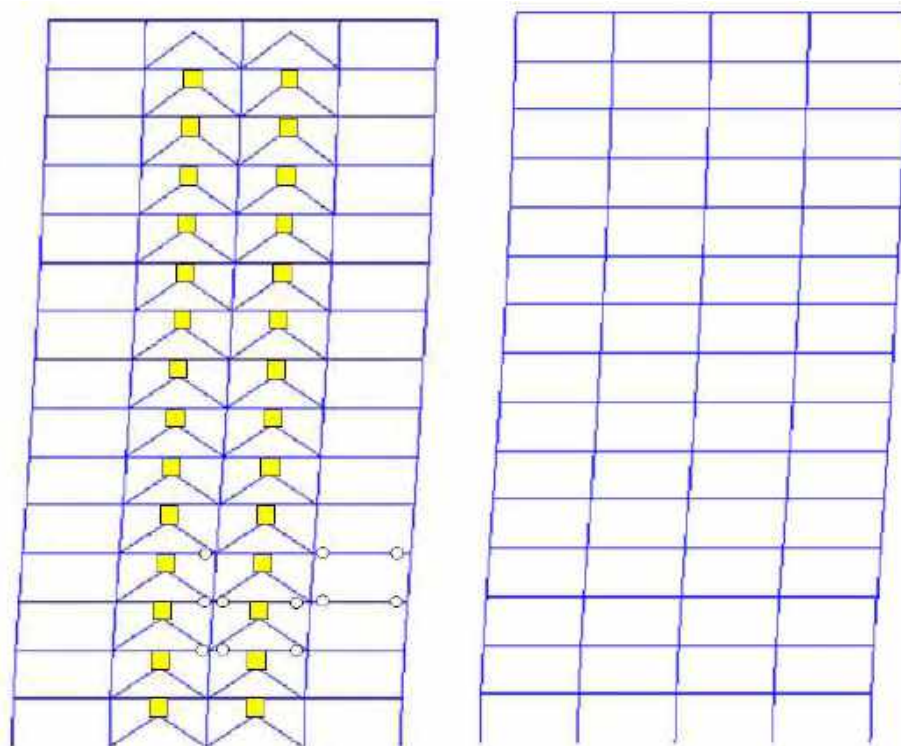
Figura G.74. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

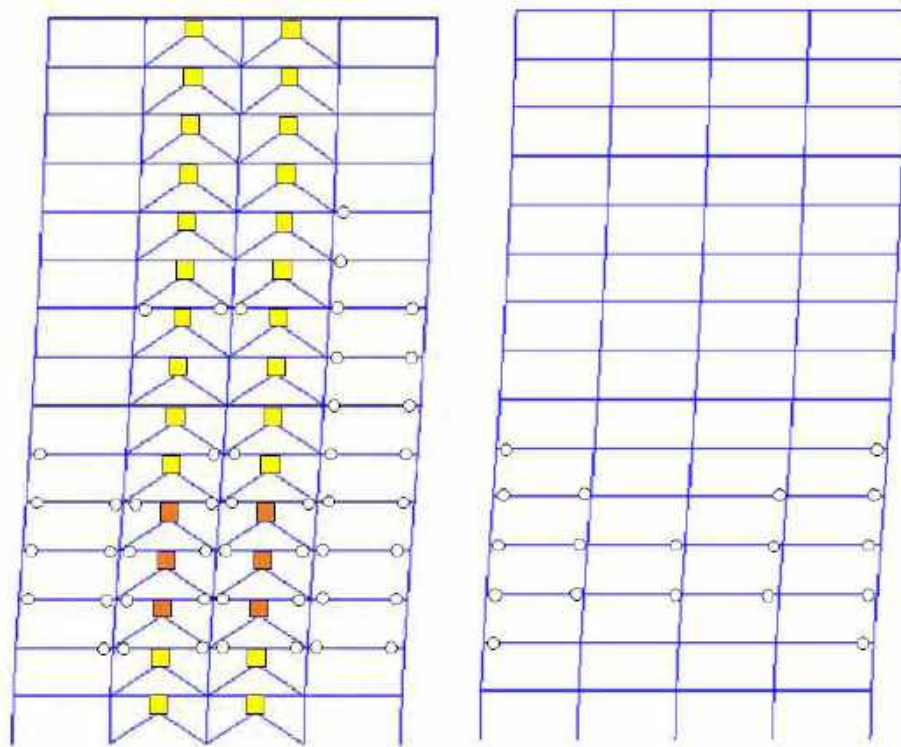
Figura G.75. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CU80-A (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

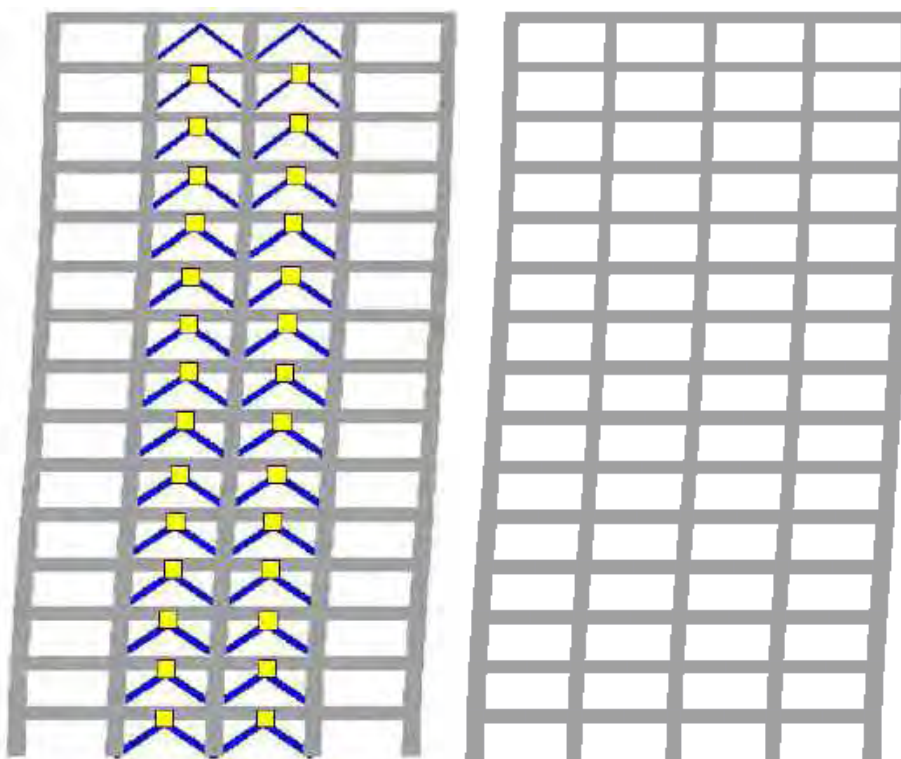
Figura G.76. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CU80-B (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

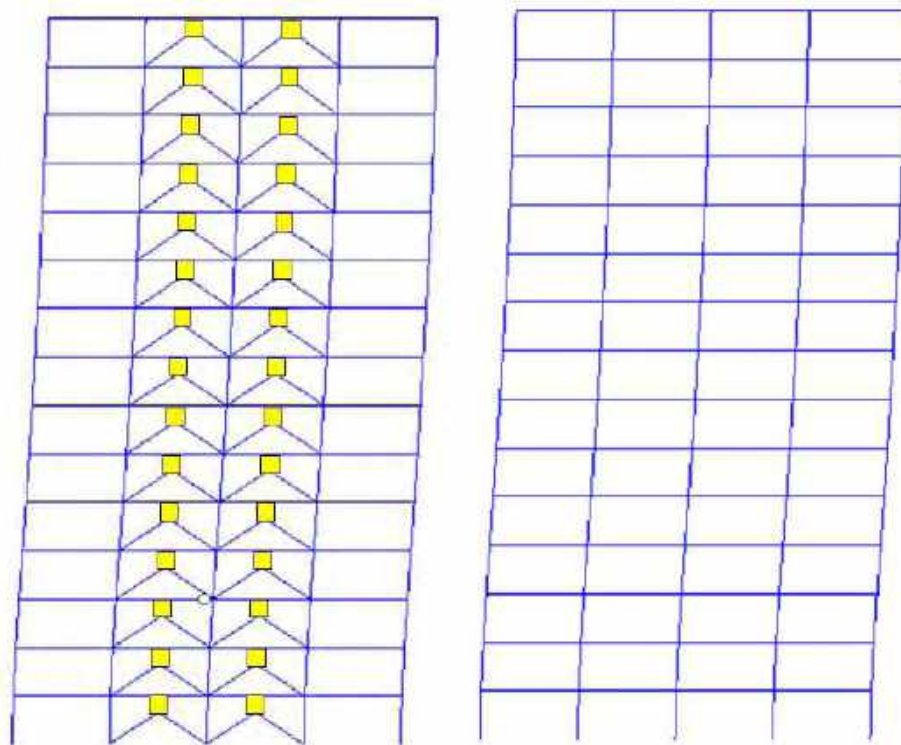
Figura G.77. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DX37-A (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

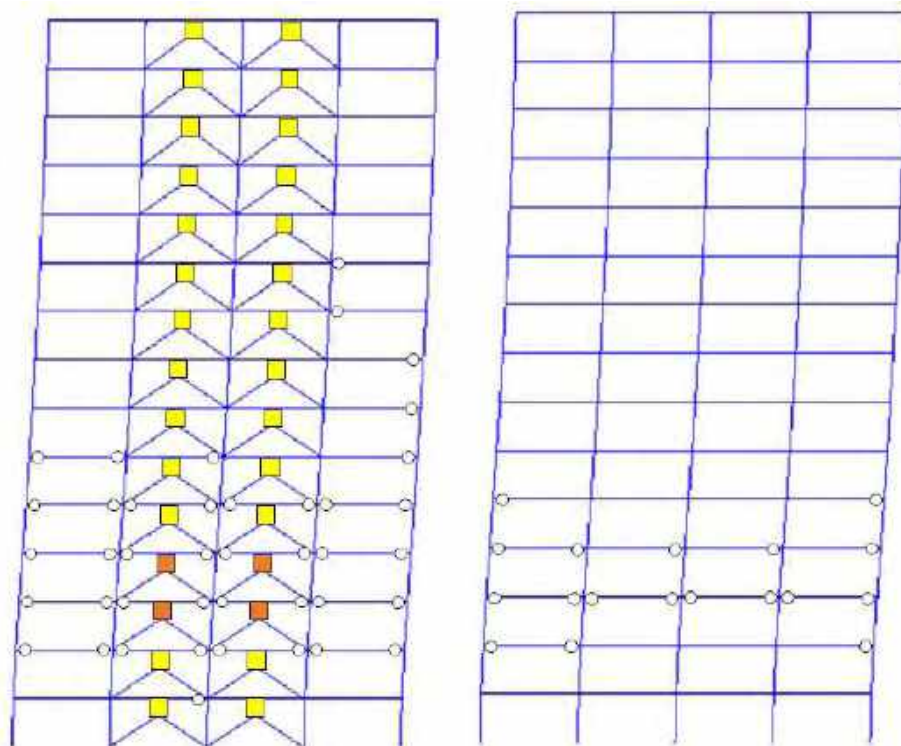
Figura G.78. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DX37-B (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura G.79. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración JC54-A (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura G.80. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.1.6 Mapeos de fluencia en dirección y

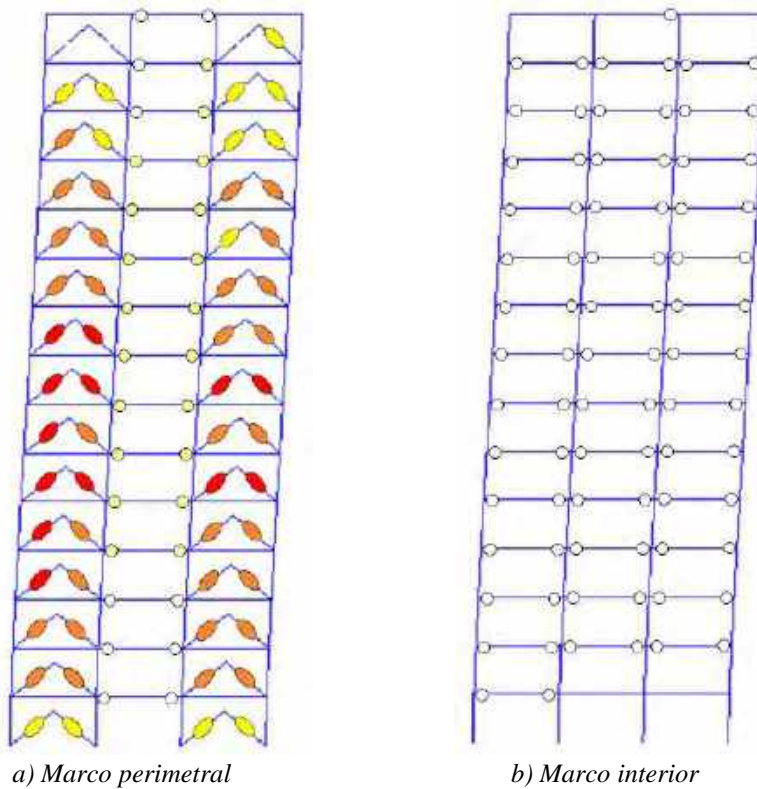
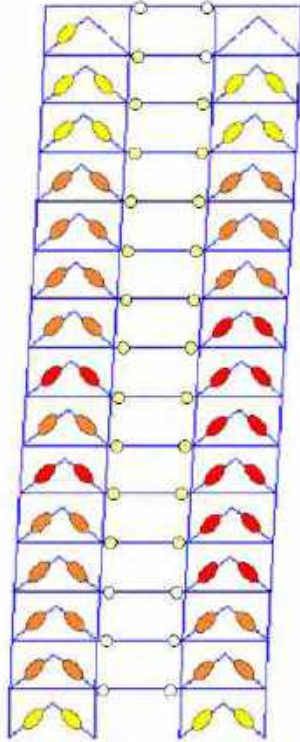
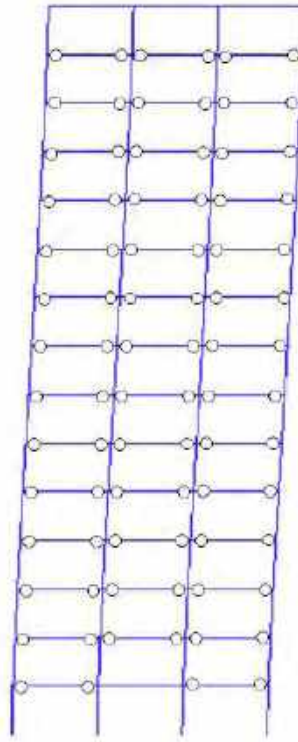


Figura G.81. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CM-A

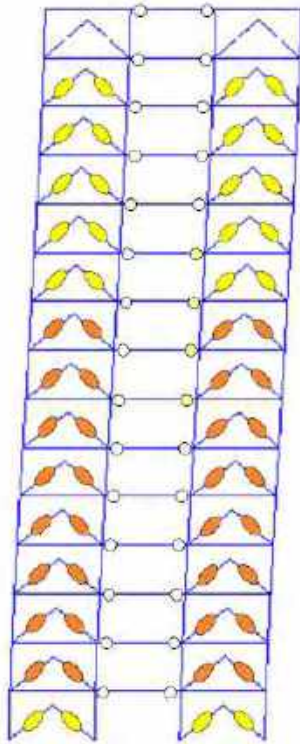


a) Marco perimetral

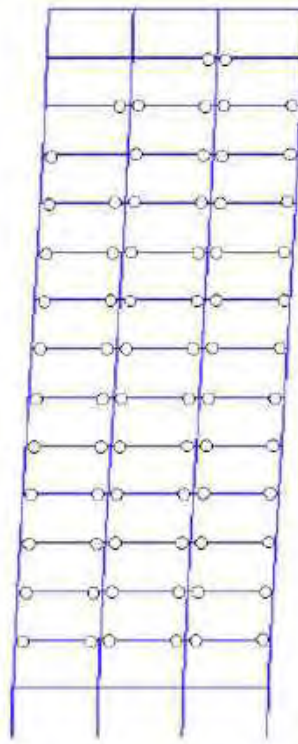


b) Marco interior

Figura G.82. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CM-B

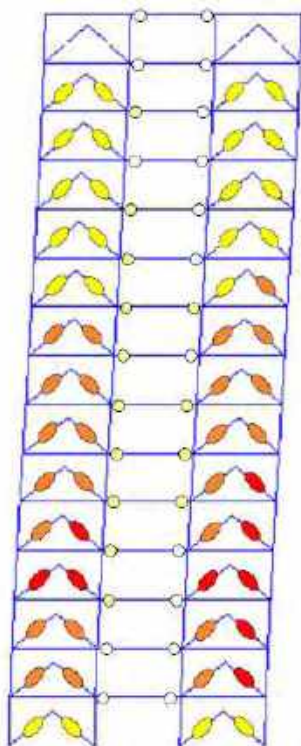


a) Marco perimetral

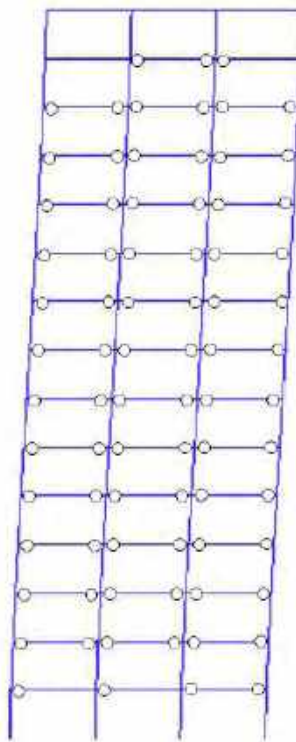


b) Marco interior

Figura G.83. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DFRO-A

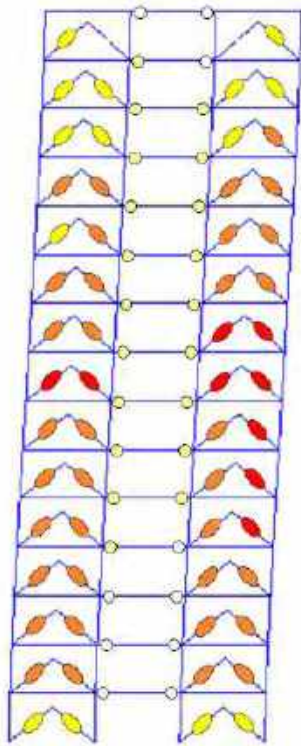


a) Marco perimetral

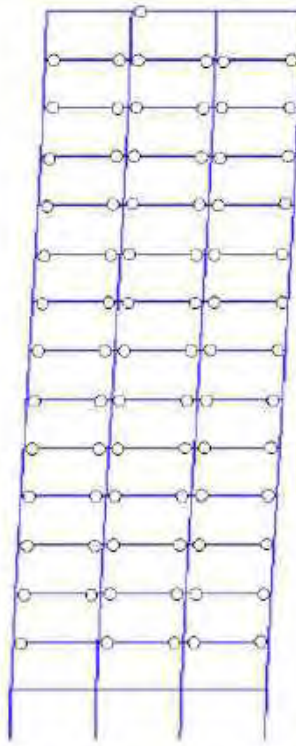


b) Marco interior

Figura G.84. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DFRO –B

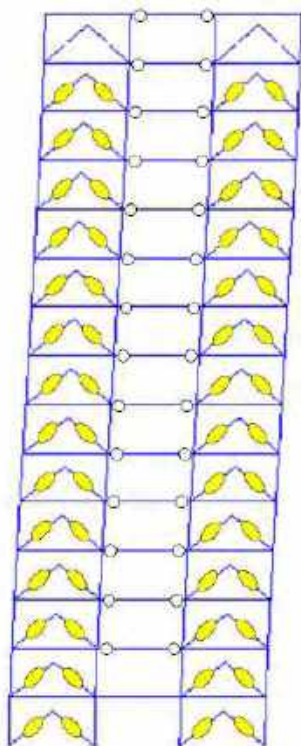


a) Marco perimetral

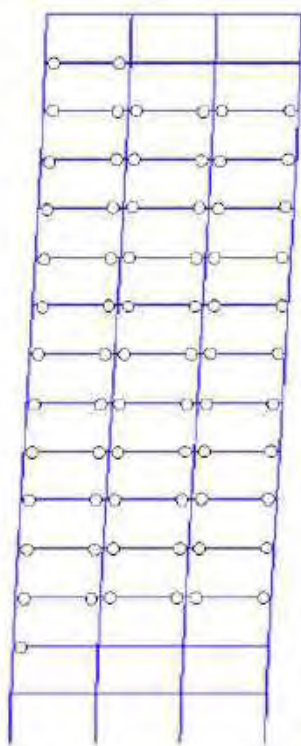


b) Marco interior

Figura G.85. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración IMSR-A

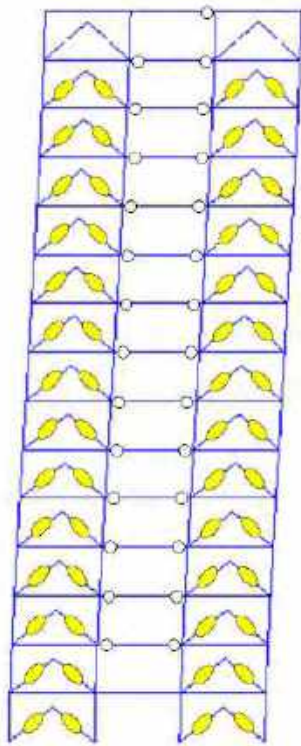


a) Marco perimetral

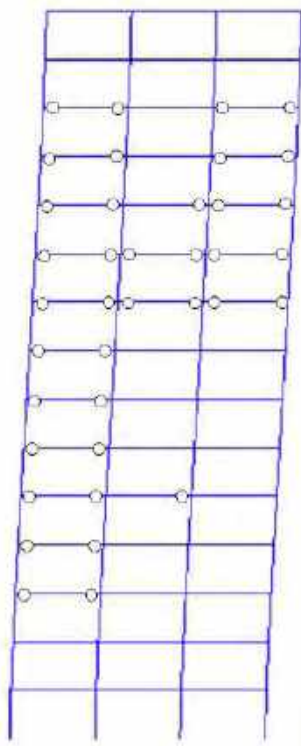


b) Marco interior

Figura G.86. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración IMSR –B

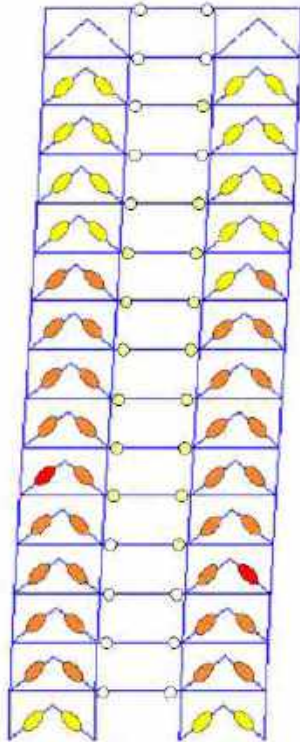


a) Marco perimetral

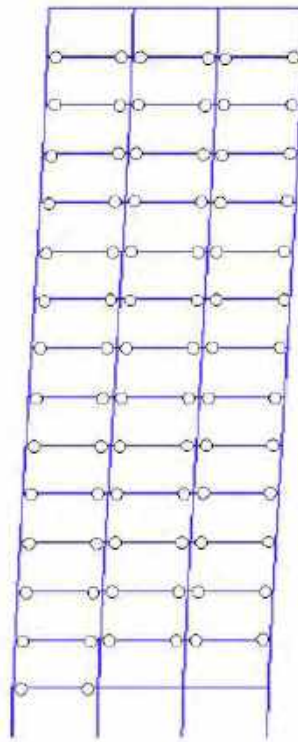


b) Marco interior

Figura G.87. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SMR-A

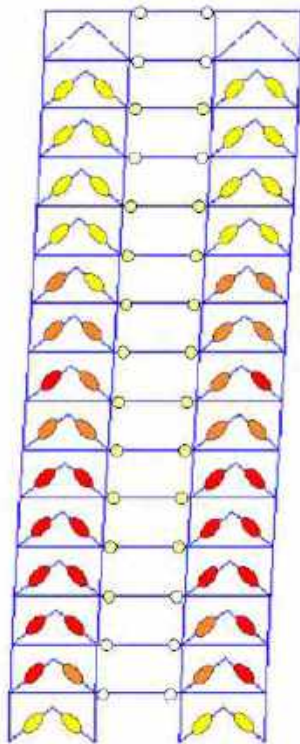


a) Marco perimetral

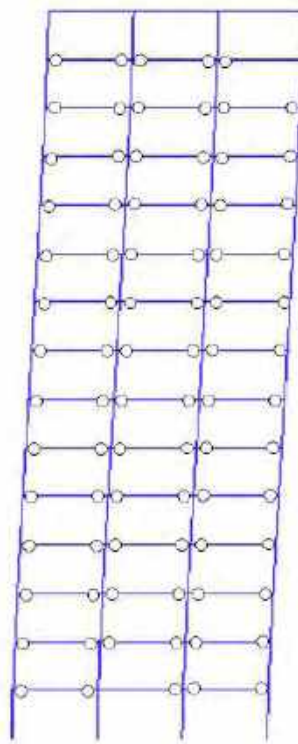


b) Marco interior

Figura G.88. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SMR –B

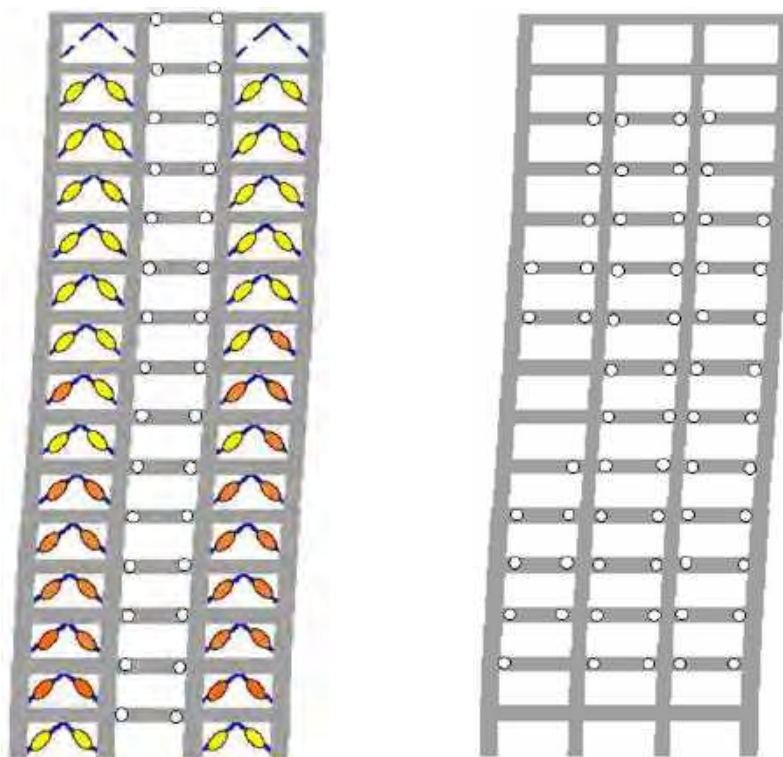


a) Marco perimetral

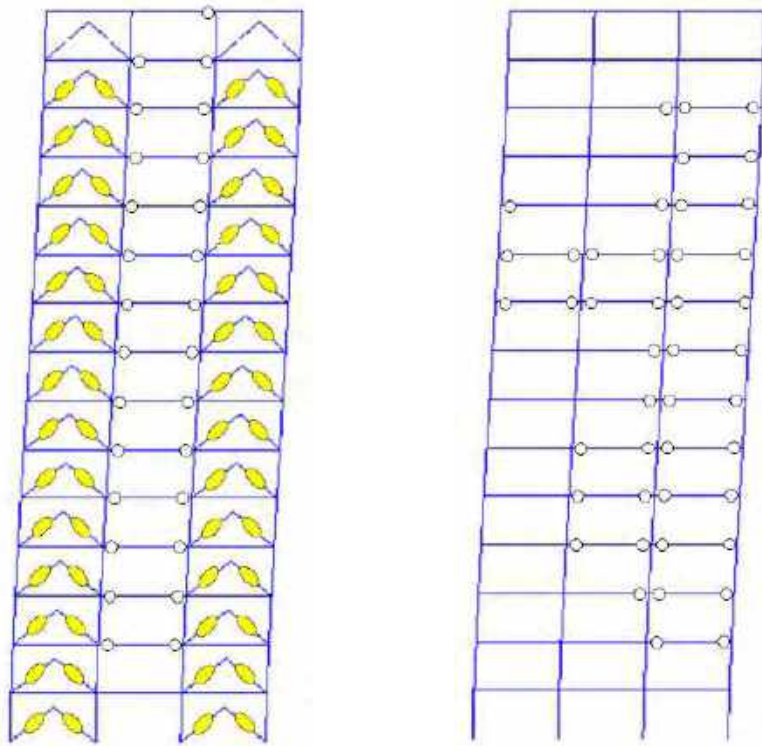


b) Marco interior

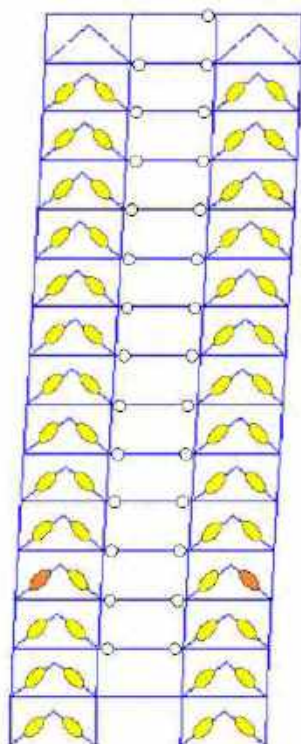
Figura G.89. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MII5-A



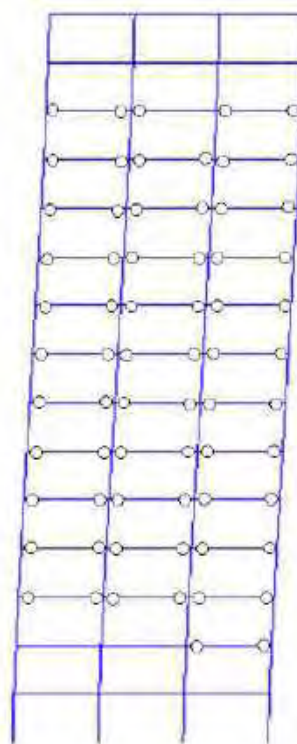
a) Marco perimetral
b) Marco interior
Figura G.90. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MII5-B



a) Marco perimetral
b) Marco interior
Figura G.91. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CU80-A (2017)

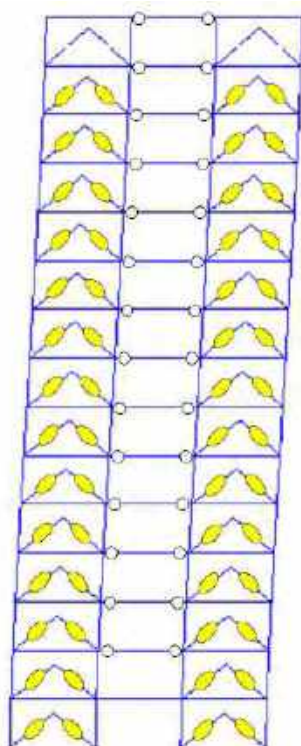


a) Marco perimetral

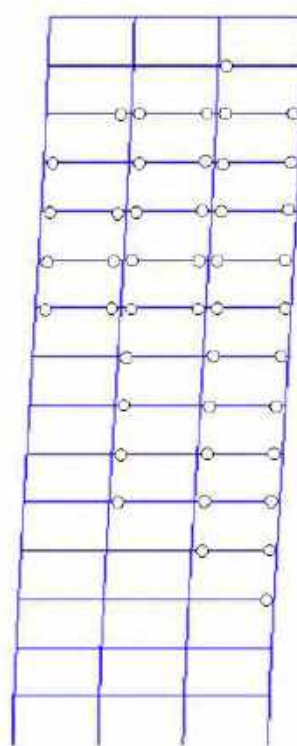


b) Marco interior

Figura G.92. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CU80-B (2017)

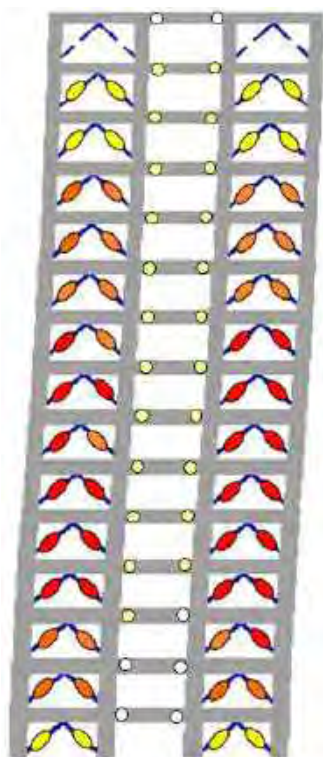


a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura G.93. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DX37-A (2017)

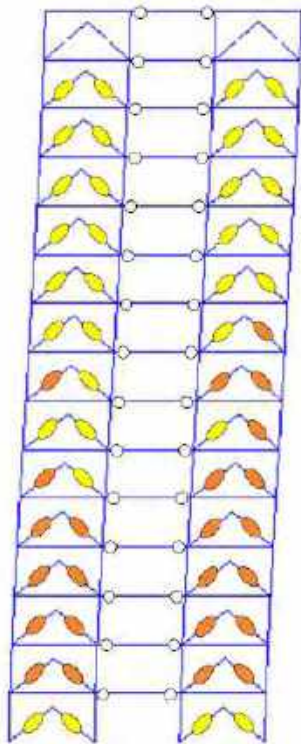


a) Marco perimetral

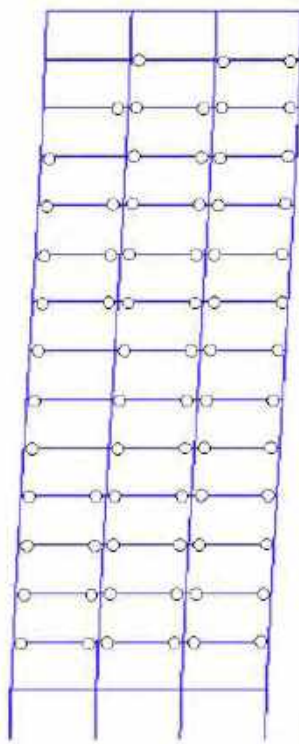


b) Marco interior

Figura G.94. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DX37-B (2017)

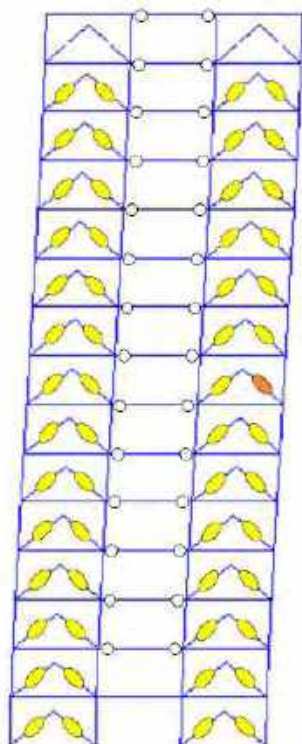


a) Marco perimetral

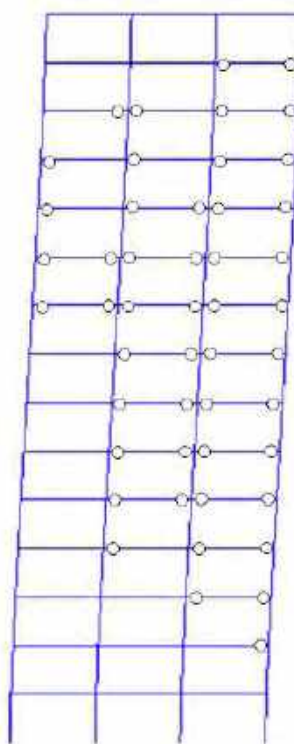


b) Marco interior

Figura G.95. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración JC54-A (2017)



a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura G.96. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.1.7 Respuesta Global

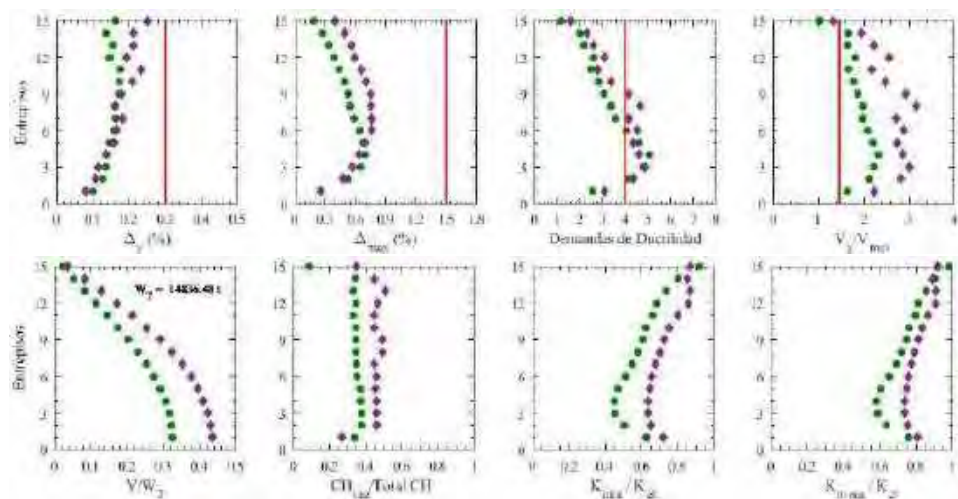


Figura G.97. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CM-A

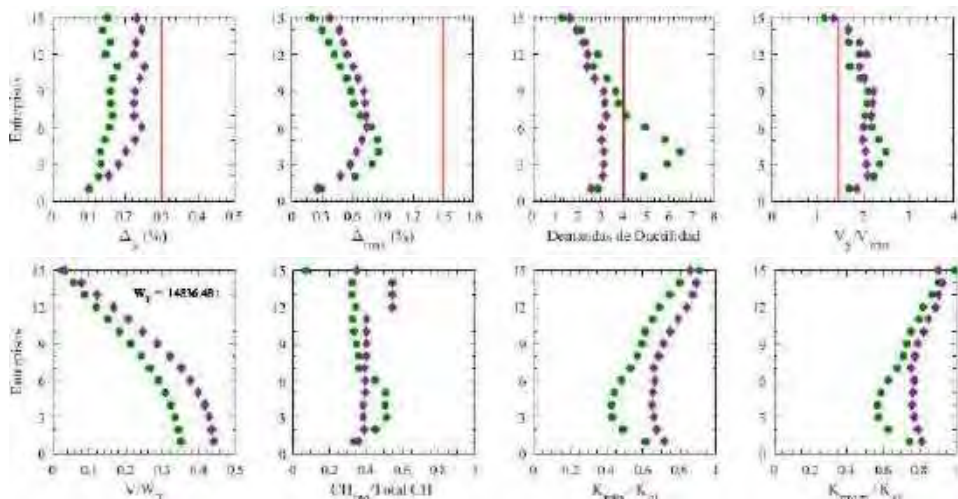


Figura G.98. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CM-B

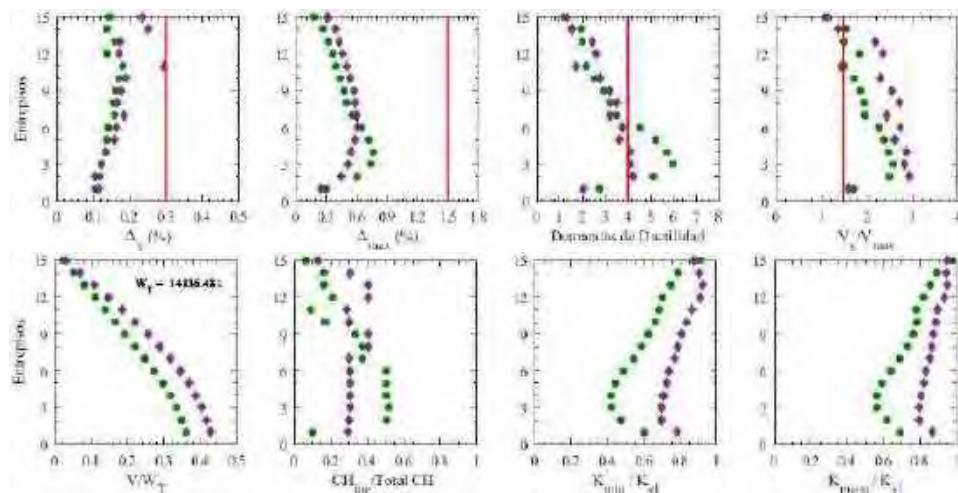


Figura G.99. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DFRO-A

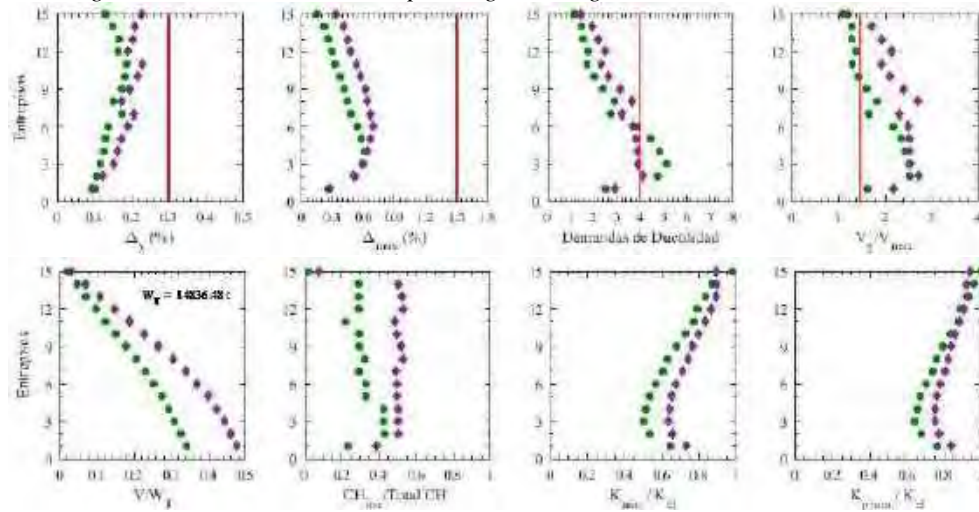


Figura G.100. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DFRO-B

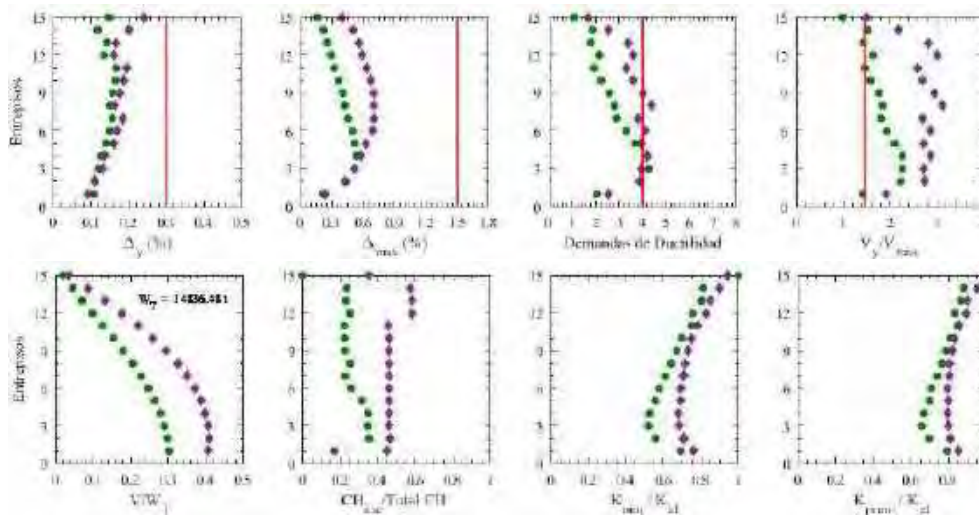


Figura G.101. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración IMSR-A

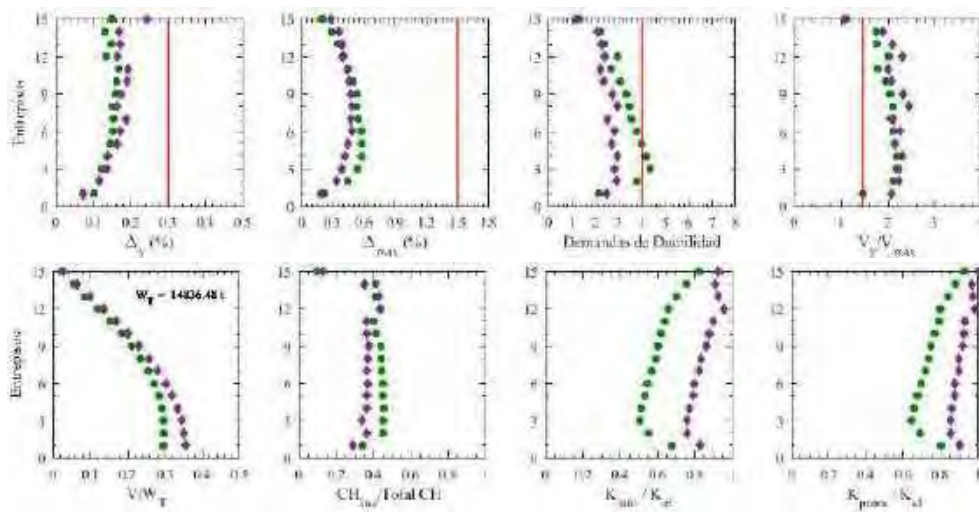


Figura G.102. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración IMSR –B

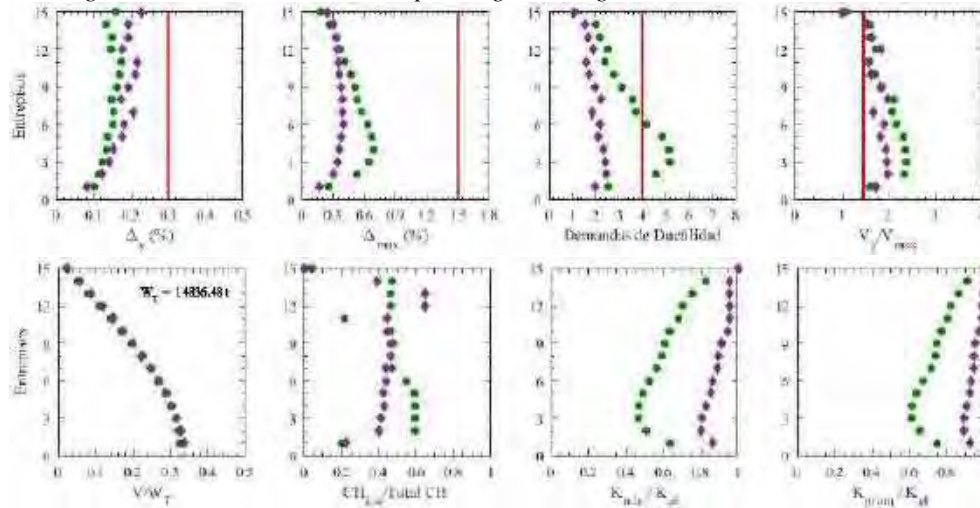


Figura G.103. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración SMR-A

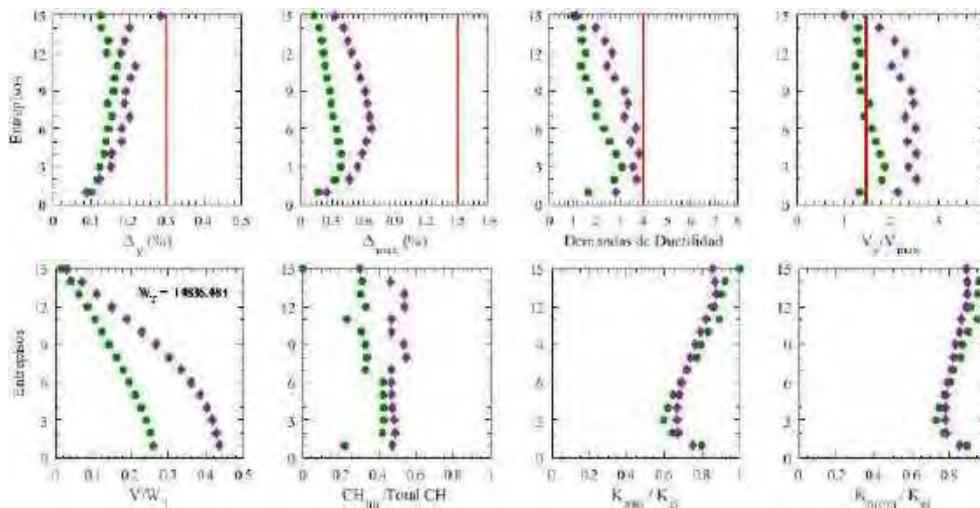


Figura G.104. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración SMR-B

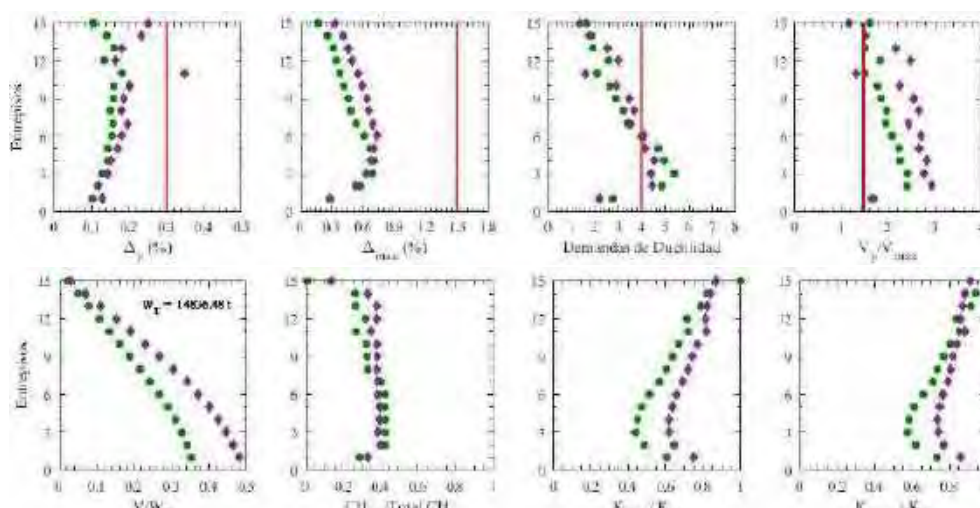


Figura G.105. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración MI15-A

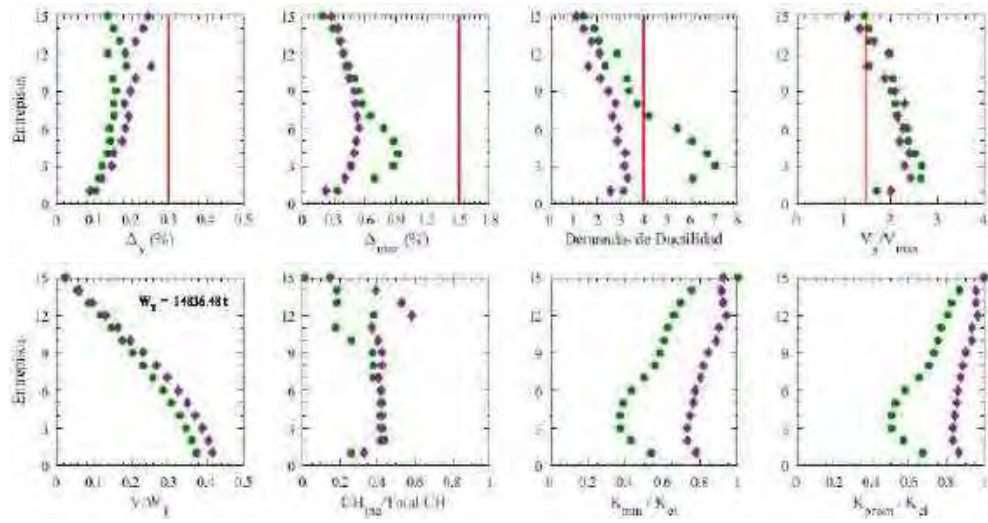


Figura G.106. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración MI15-B

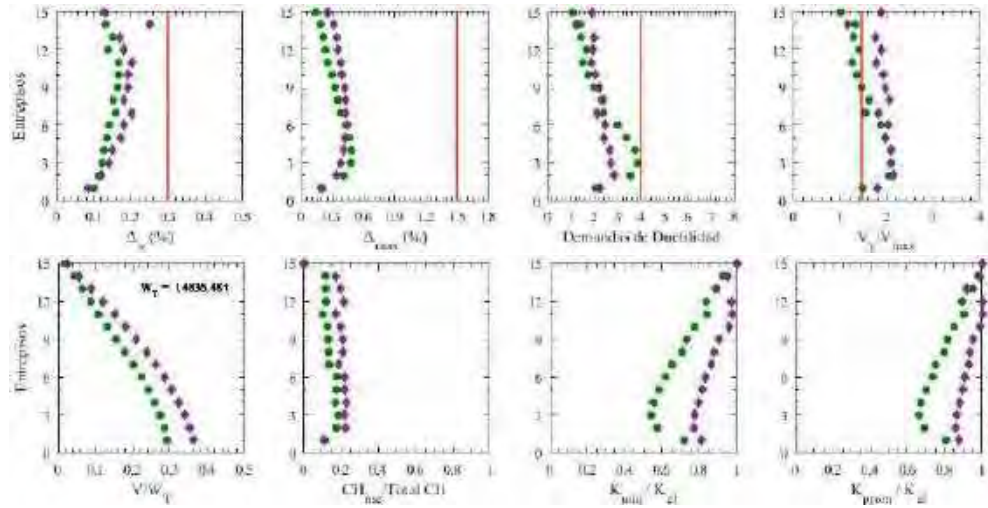


Figura G.107. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CU80-A (2017)

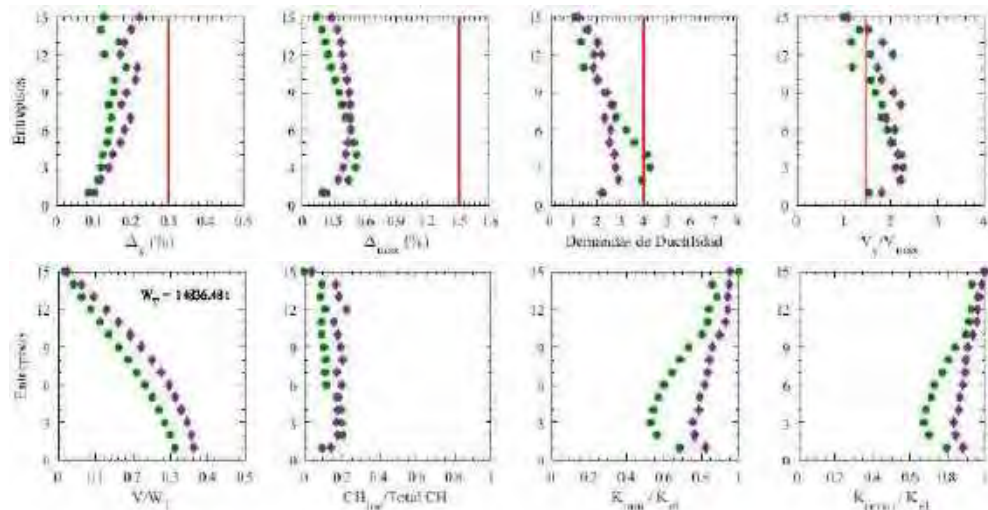


Figura G.108. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CU80-B (2017)

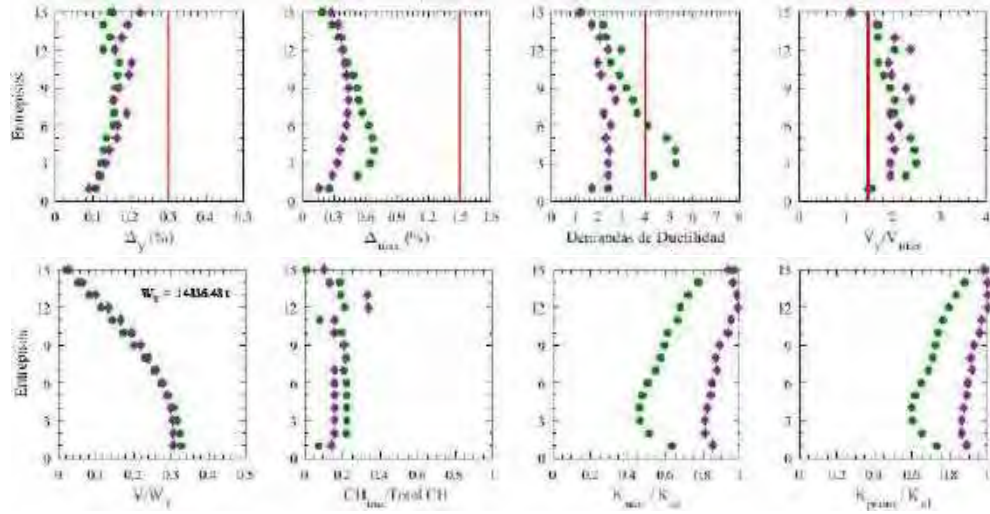


Figura G.109. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DX37-A (2017)

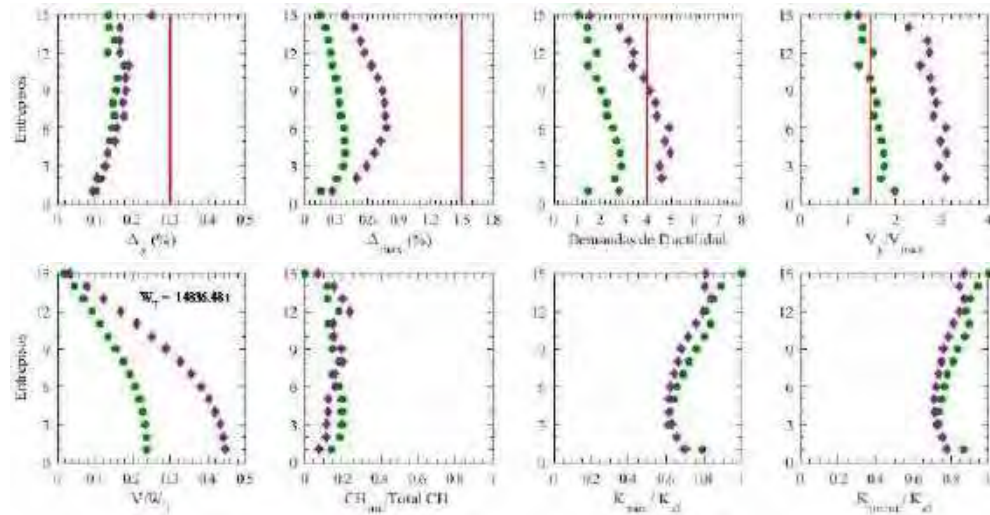


Figura G.110. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DX37-B (2017)

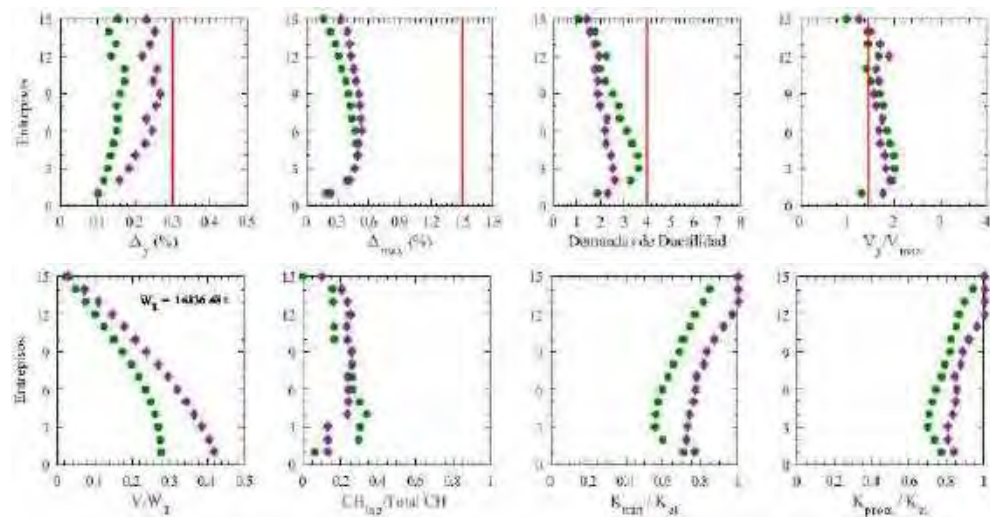


Figura G.111. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración JC54-A (2017)

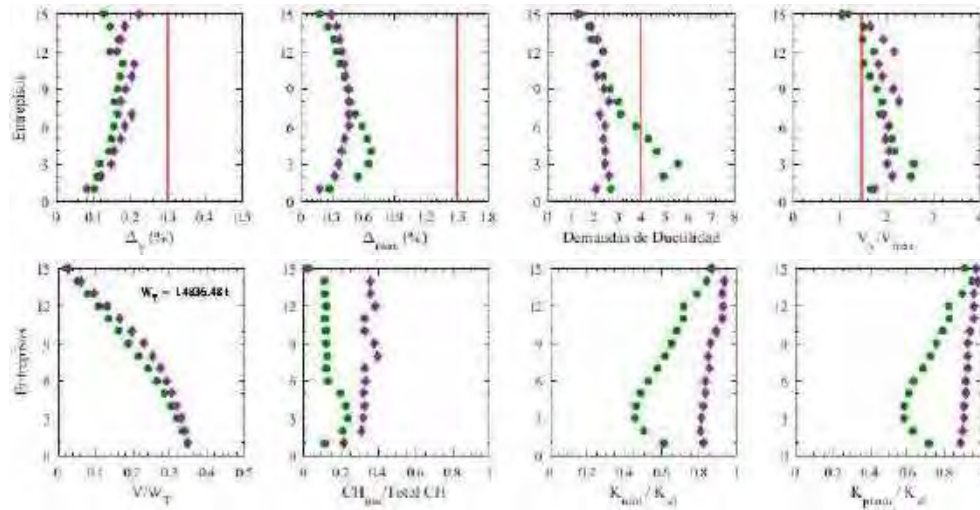


Figura G.112. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.1.8 Distorsiones Residuales

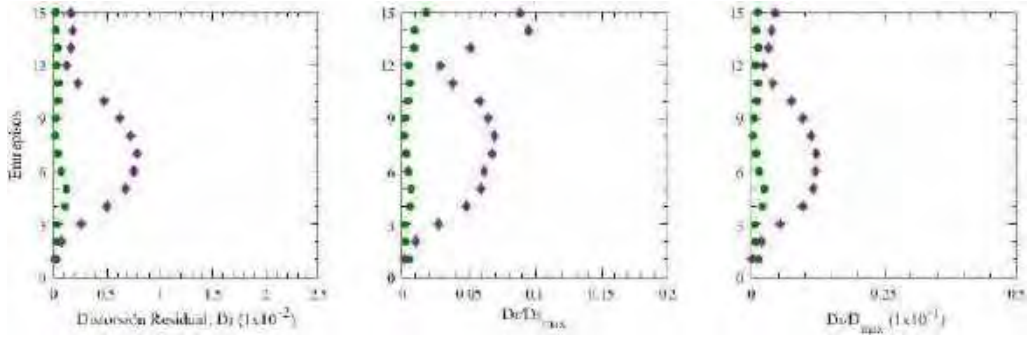


Figura G.113. Distorsiones Residuales, registros de aceleración CM-A

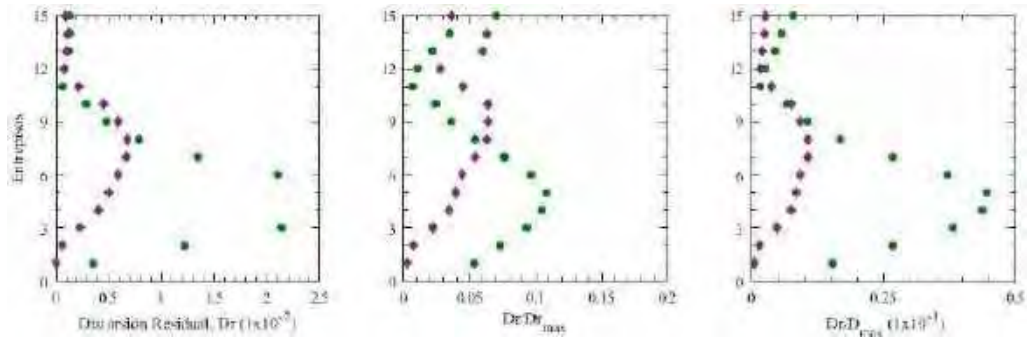


Figura G.114. Distorsiones Residuales, registros de aceleración CM-B

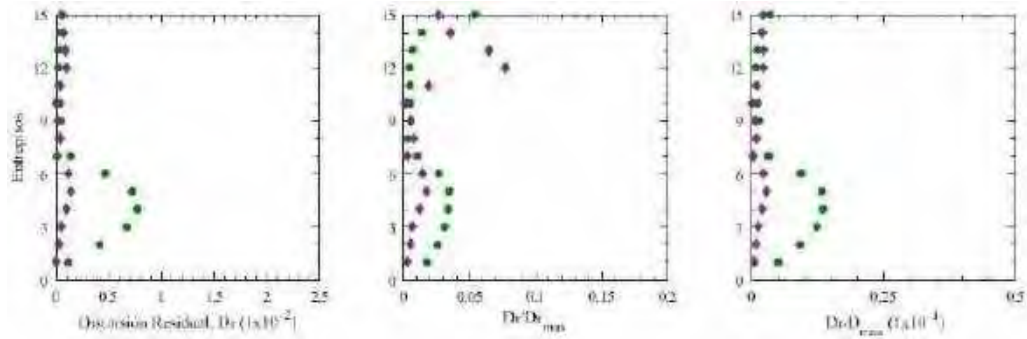


Figura G.115. Distorsiones Residuales, registros de aceleración DFRO-A

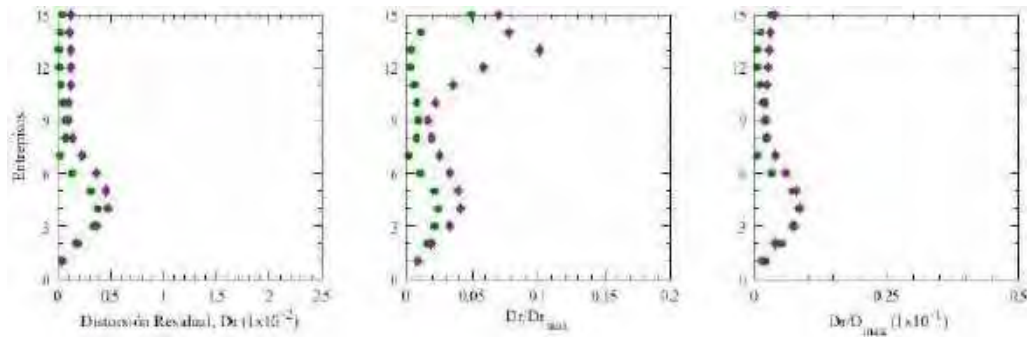


Figura G.116. Distorsiones Residuales, registros de aceleración DFRO-B

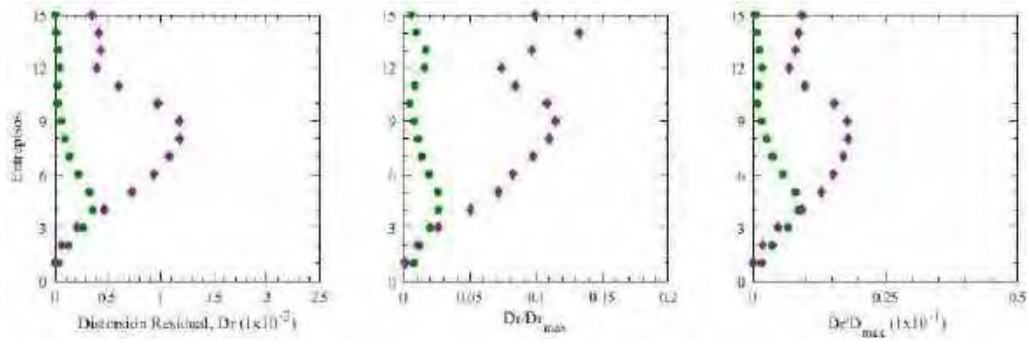


Figura G.117. Distorsiones Residuales, registros de aceleración IMSR-A

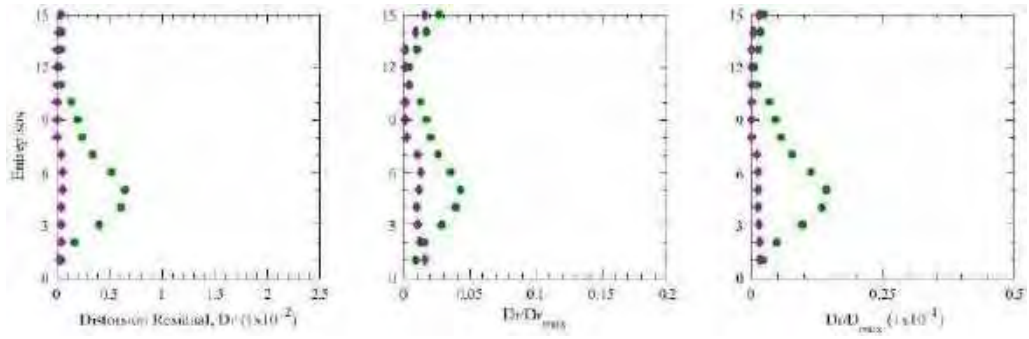


Figura G.118. Distorsiones Residuales, registros de aceleración IMSR-B

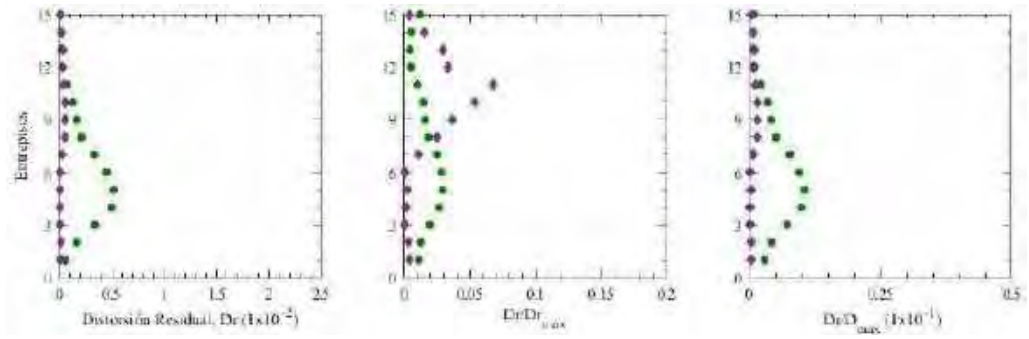


Figura G.119. Distorsiones Residuales, registros de aceleración SMR-A

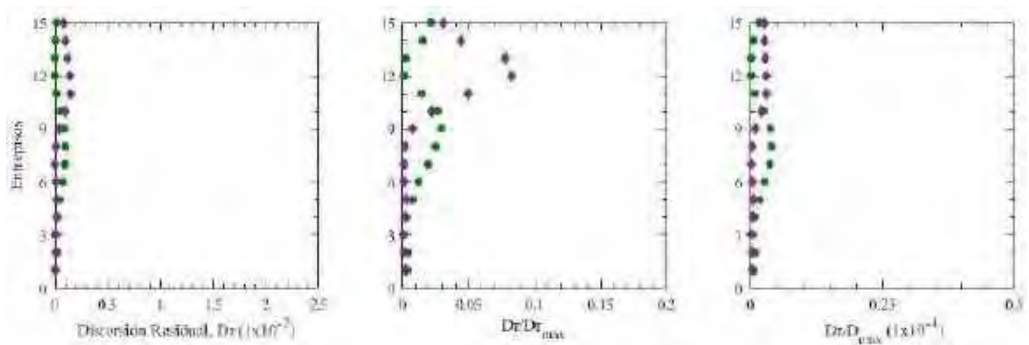


Figura G.120. Distorsiones Residuales, registros de aceleración SMR-B

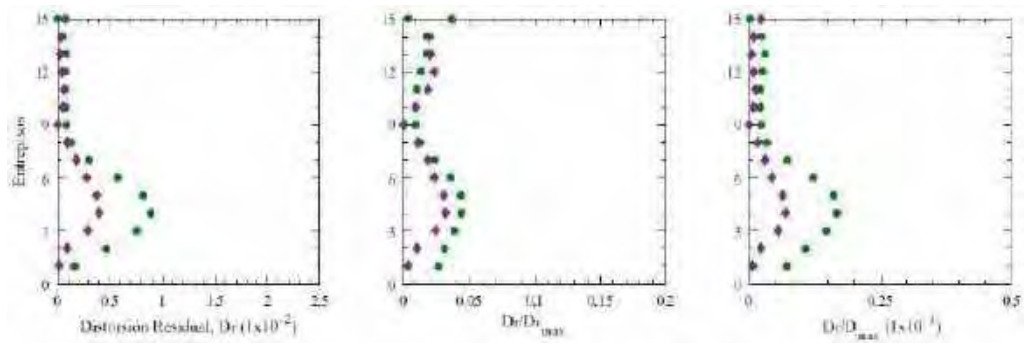


Figura G.121. Distorsiones Residuales, registros de aceleración MI15-A

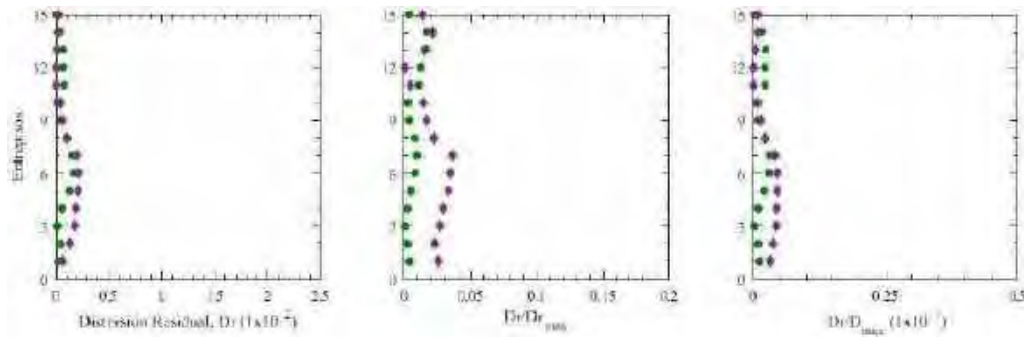


Figura G.122. Distorsiones Residuales, registros de aceleración MI15-B

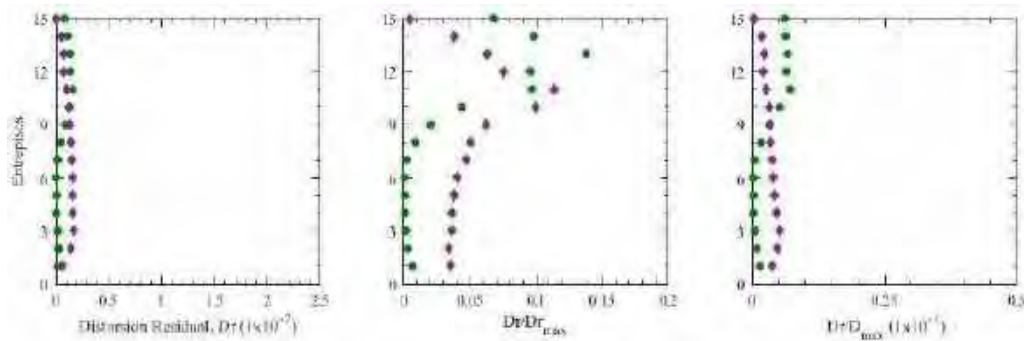


Figura G.123. Distorsiones Residuales, registros de aceleración CU80-A (2017)

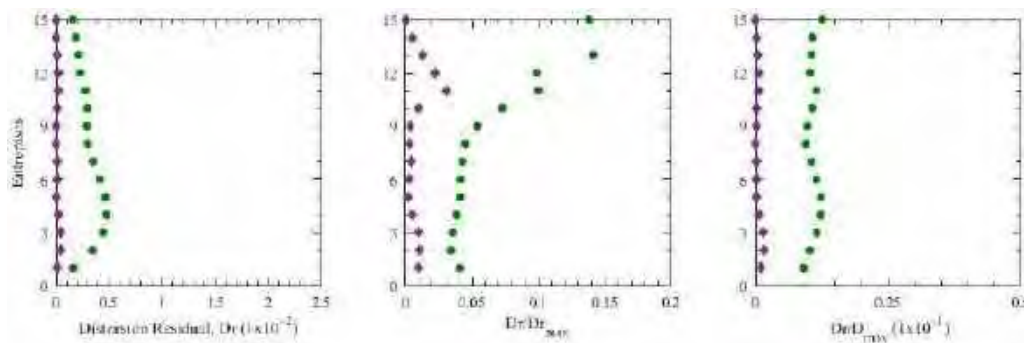


Figura G.124. Distorsiones Residuales, registros de aceleración CU80-B (2017)

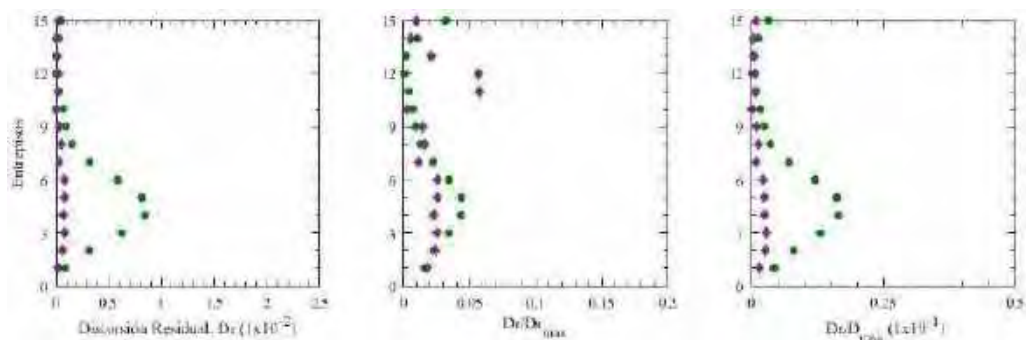


Figura G.125. Distorsiones Residuales, registros de aceleración DX37-A (2017)

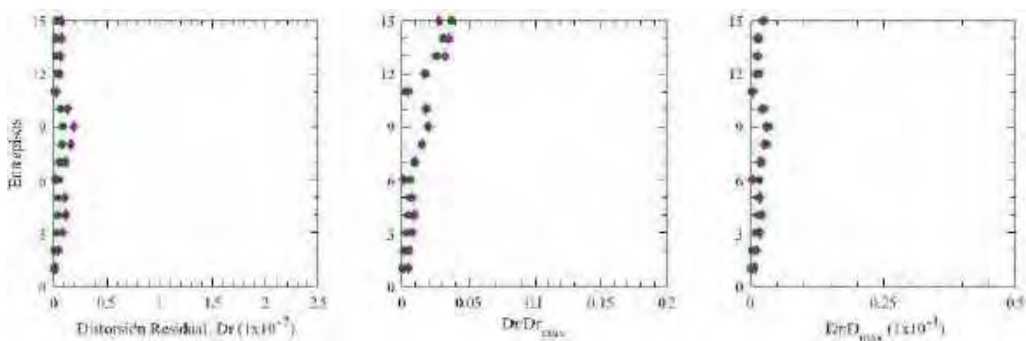


Figura G.126. Distorsiones Residuales, registros de aceleración DX37-B (2017)

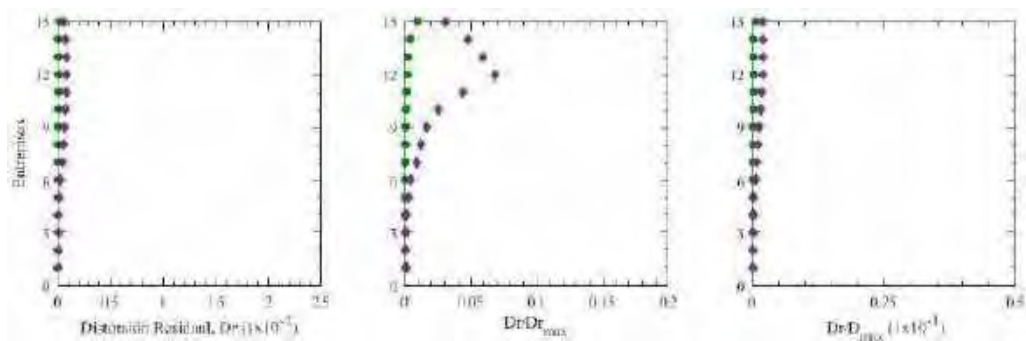


Figura G.127. Distorsiones Residuales, registros de aceleración JC54-A (2017)

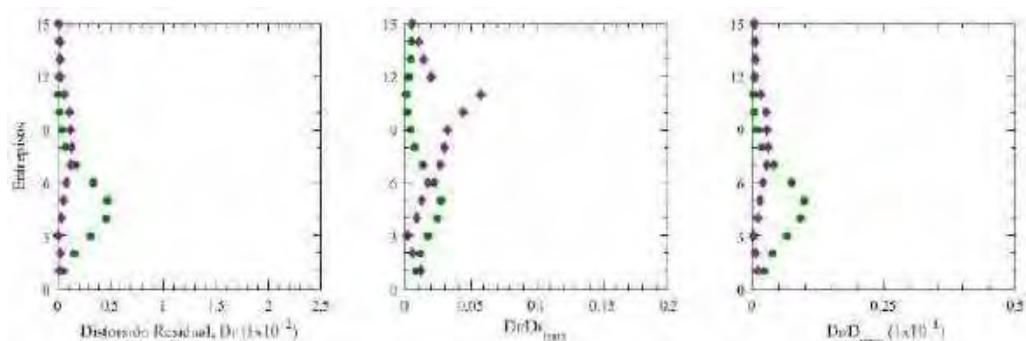


Figura G.128. Distorsiones Residuales, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.2 Base Flexible

G.2.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS

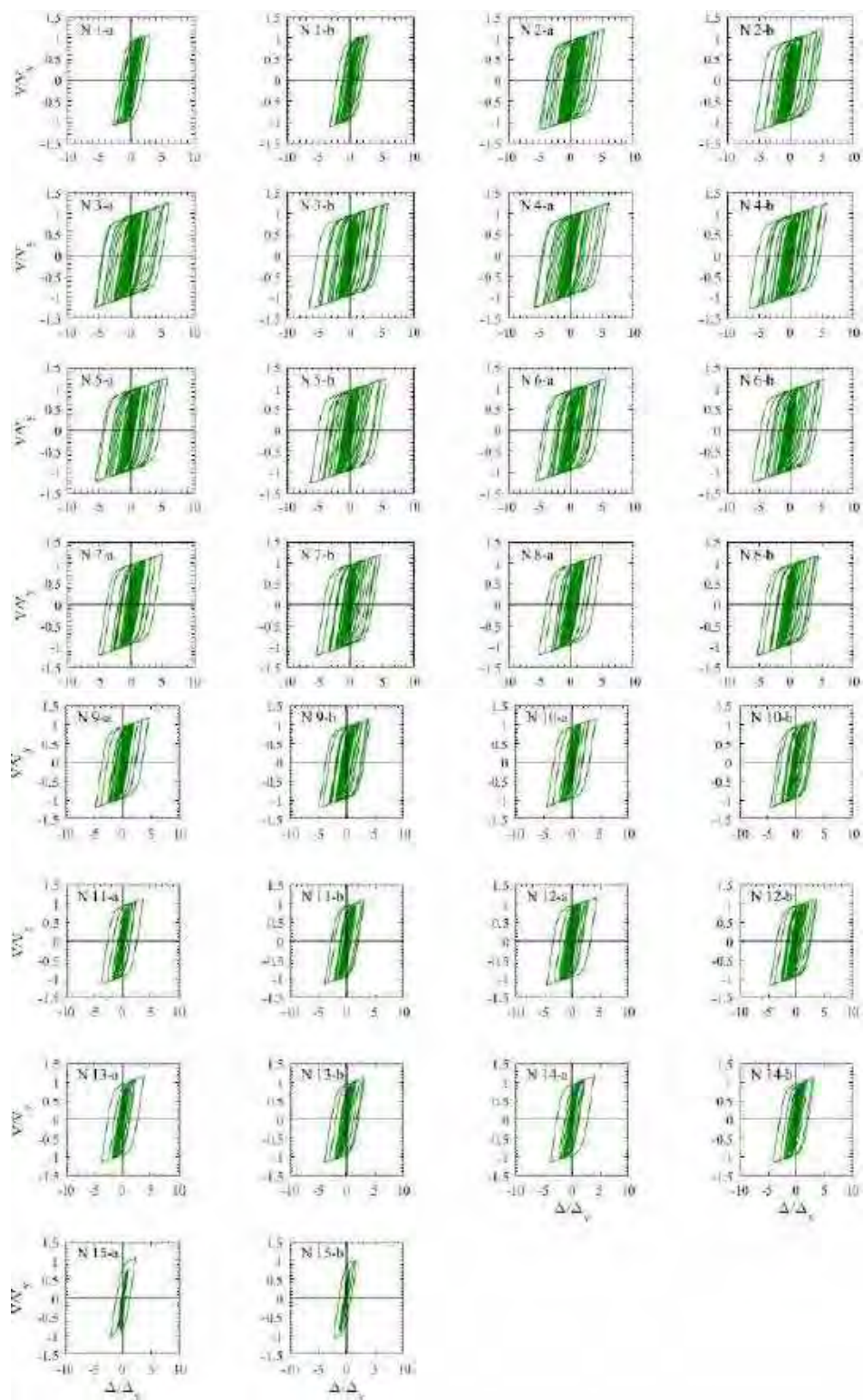


Figura G.129. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CM-A

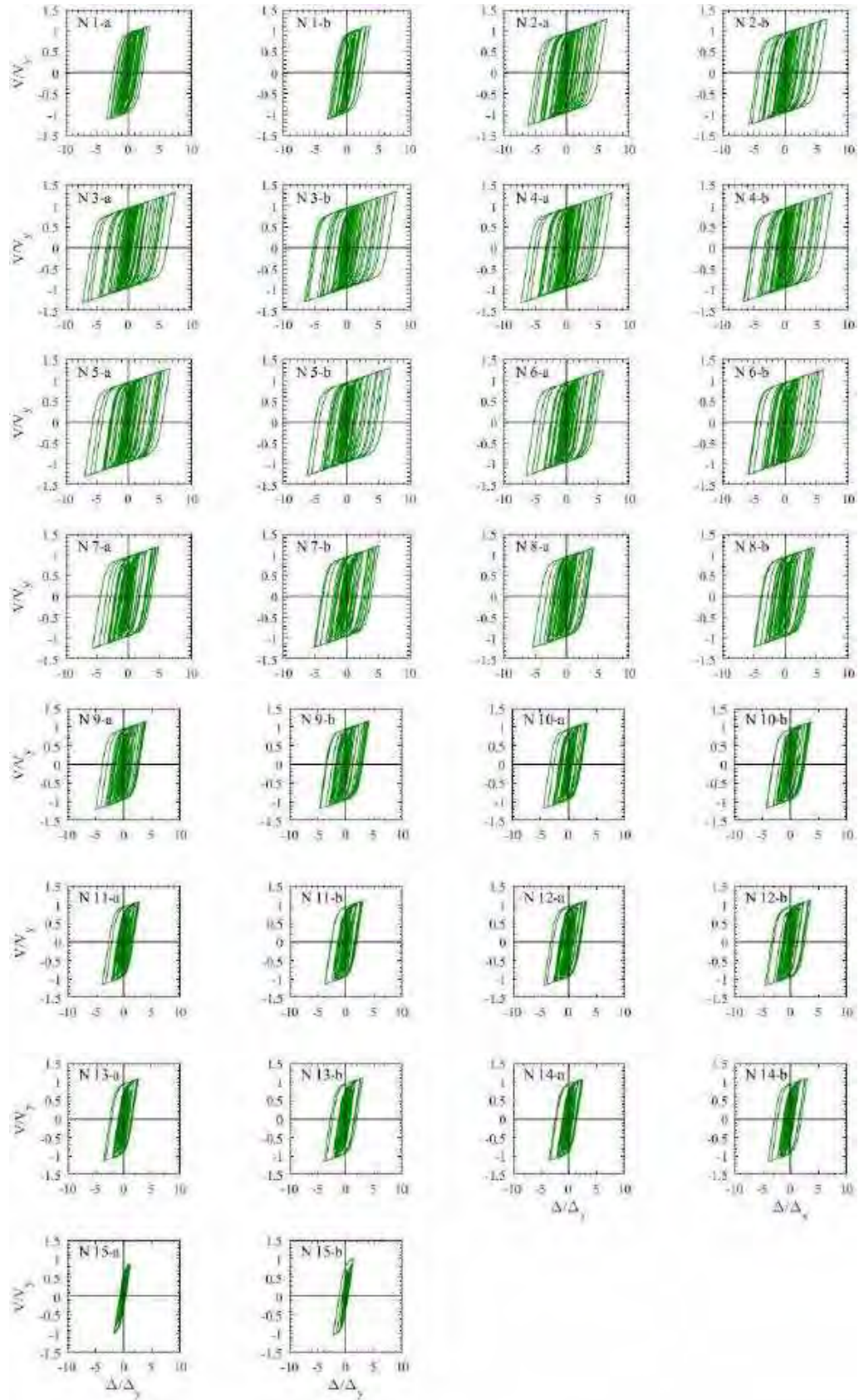


Figura G.130. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CM-B

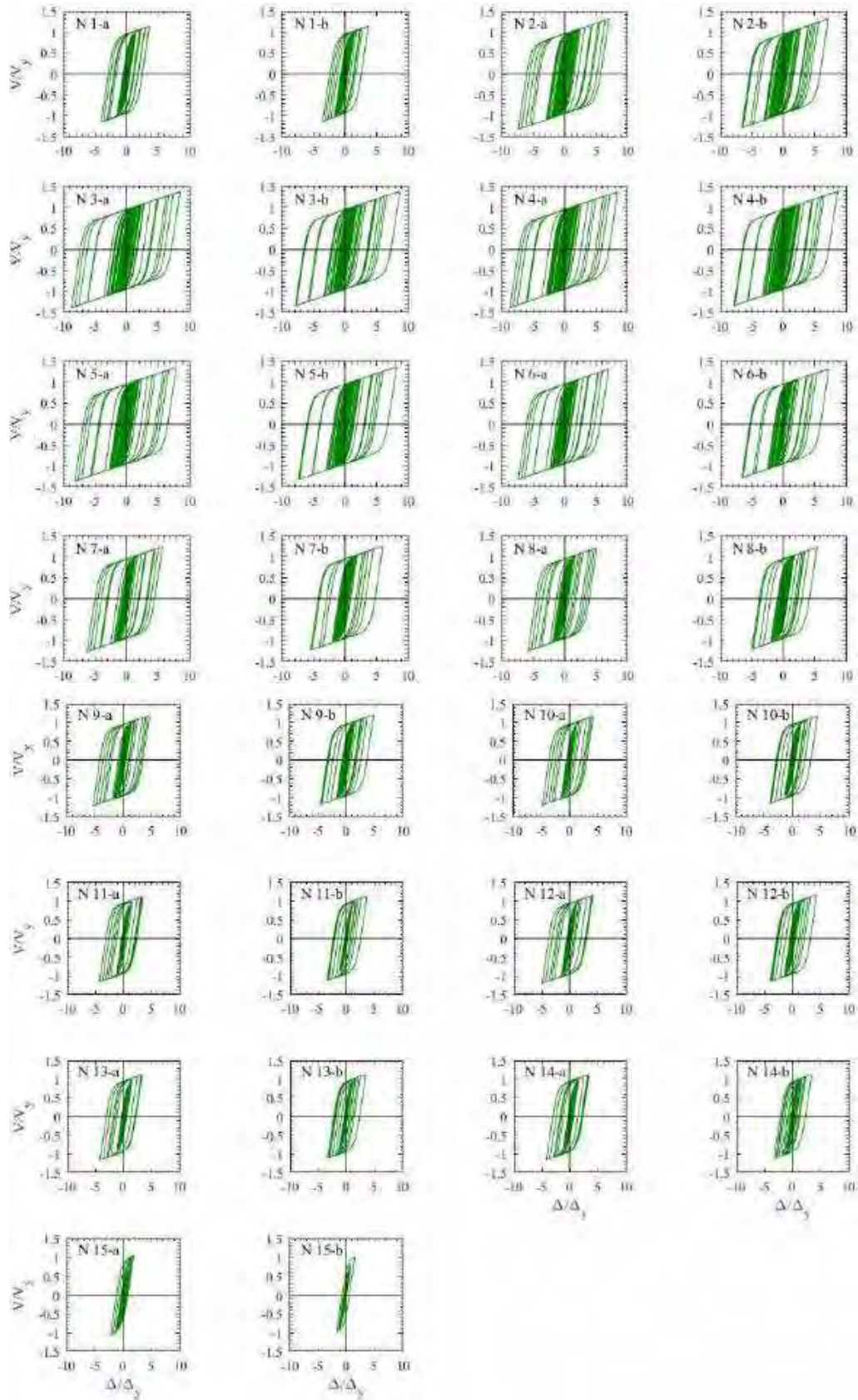


Figura G.131. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DFRO-A

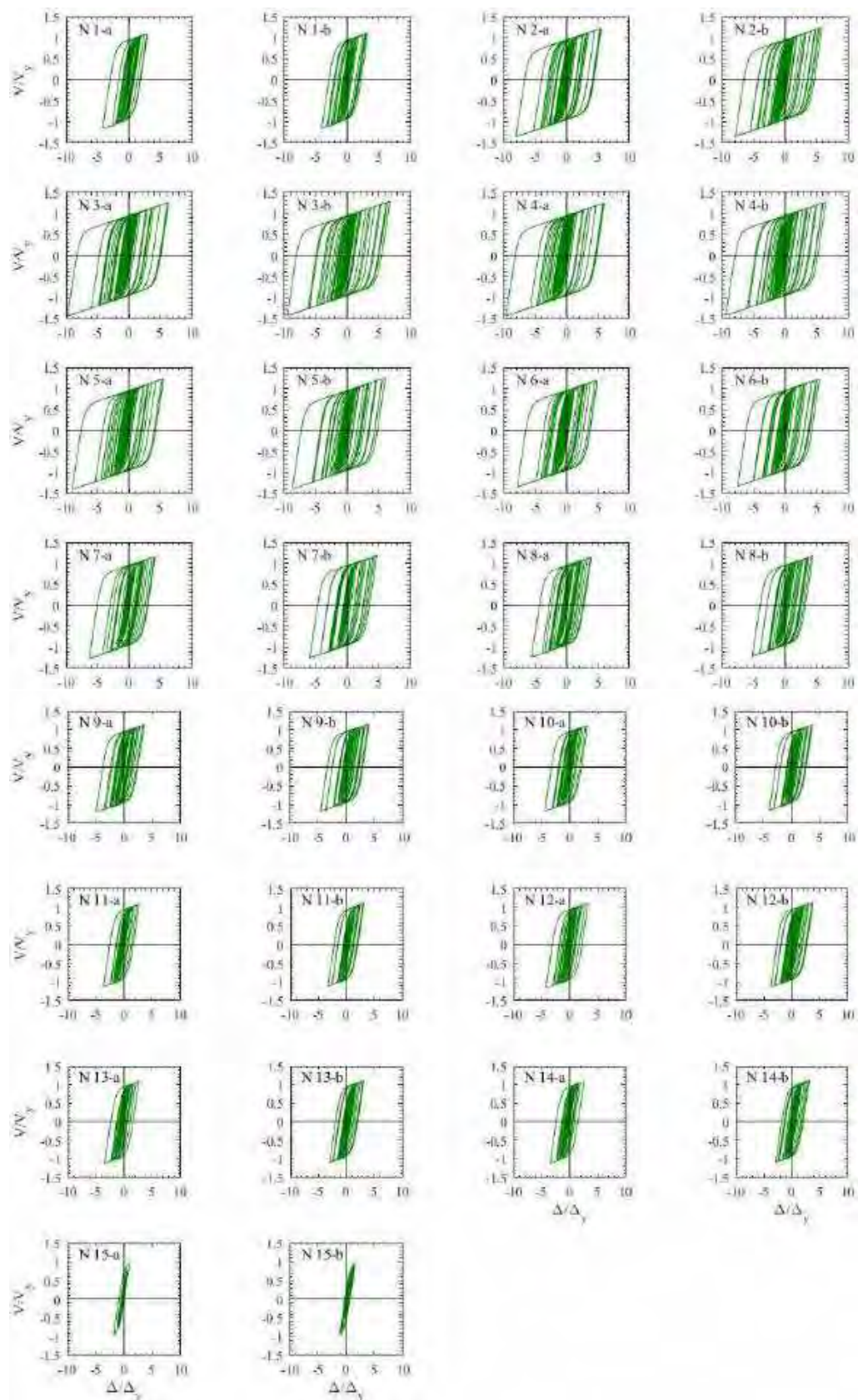


Figura G.132. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DFRO –B

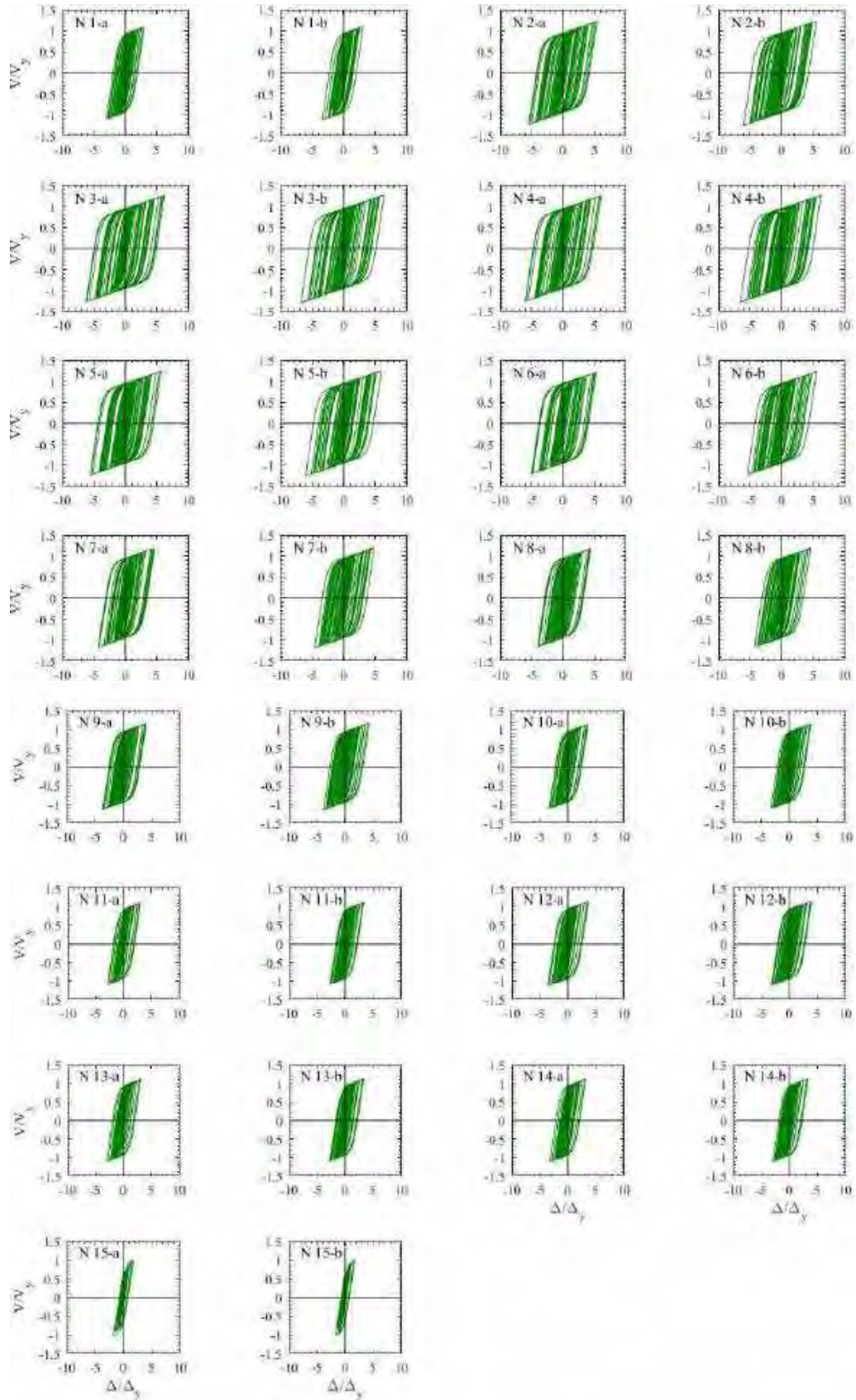


Figura G.133. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración IMSR-A

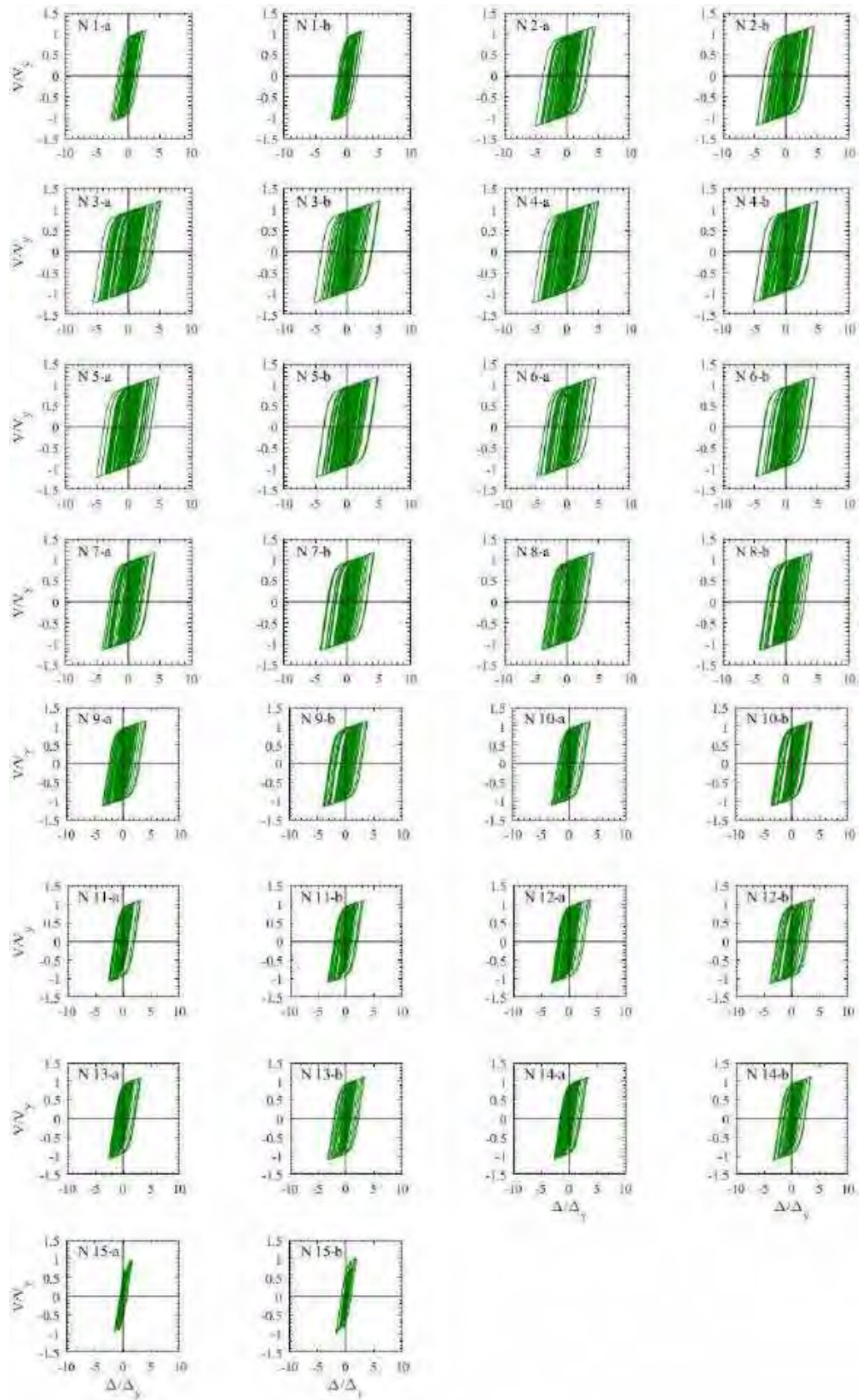


Figura G.134. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración IMSR –B

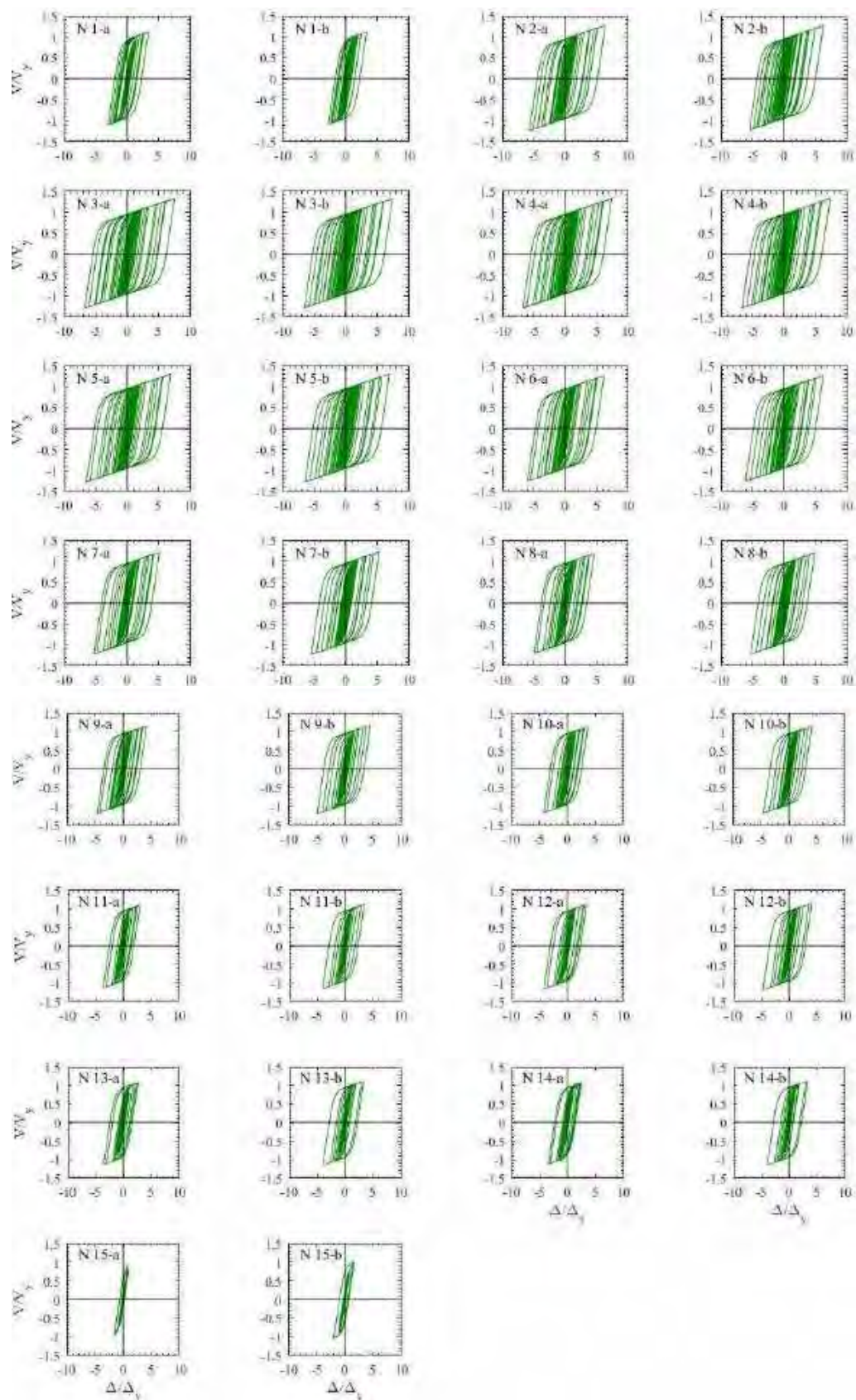


Figura G.135. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SMR-A

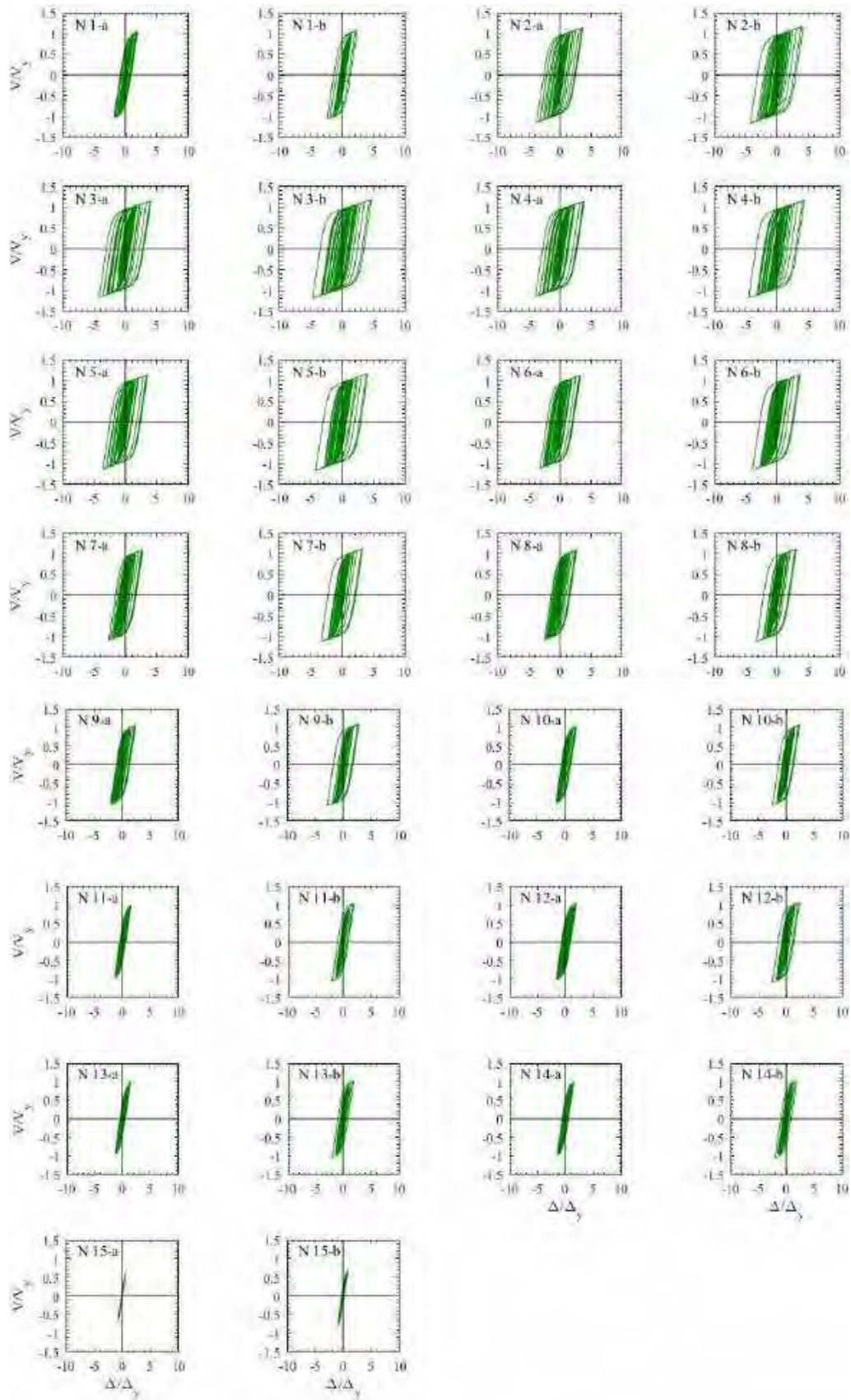


Figura G.136. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SMR –B

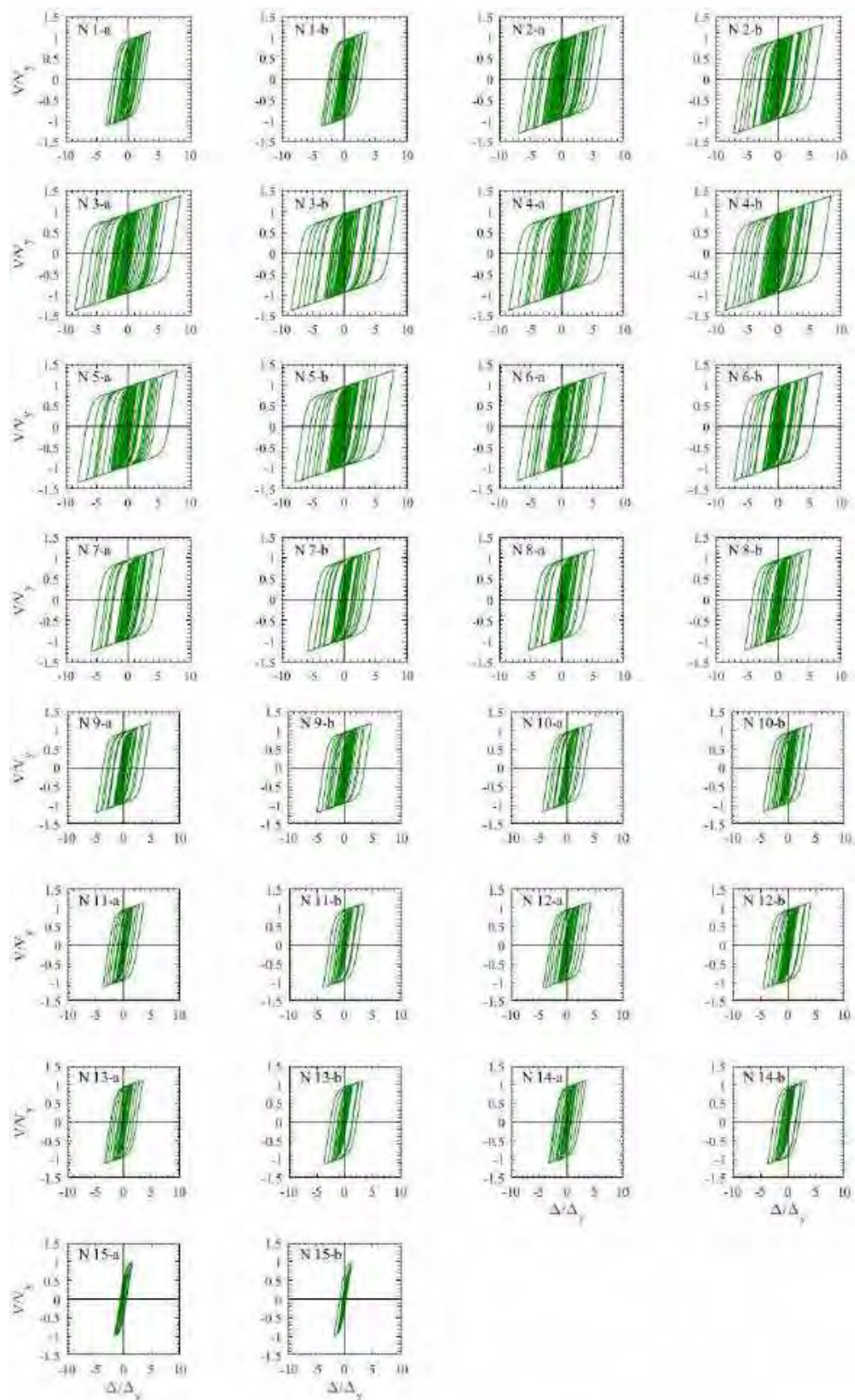


Figura G.137. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración MI15-A

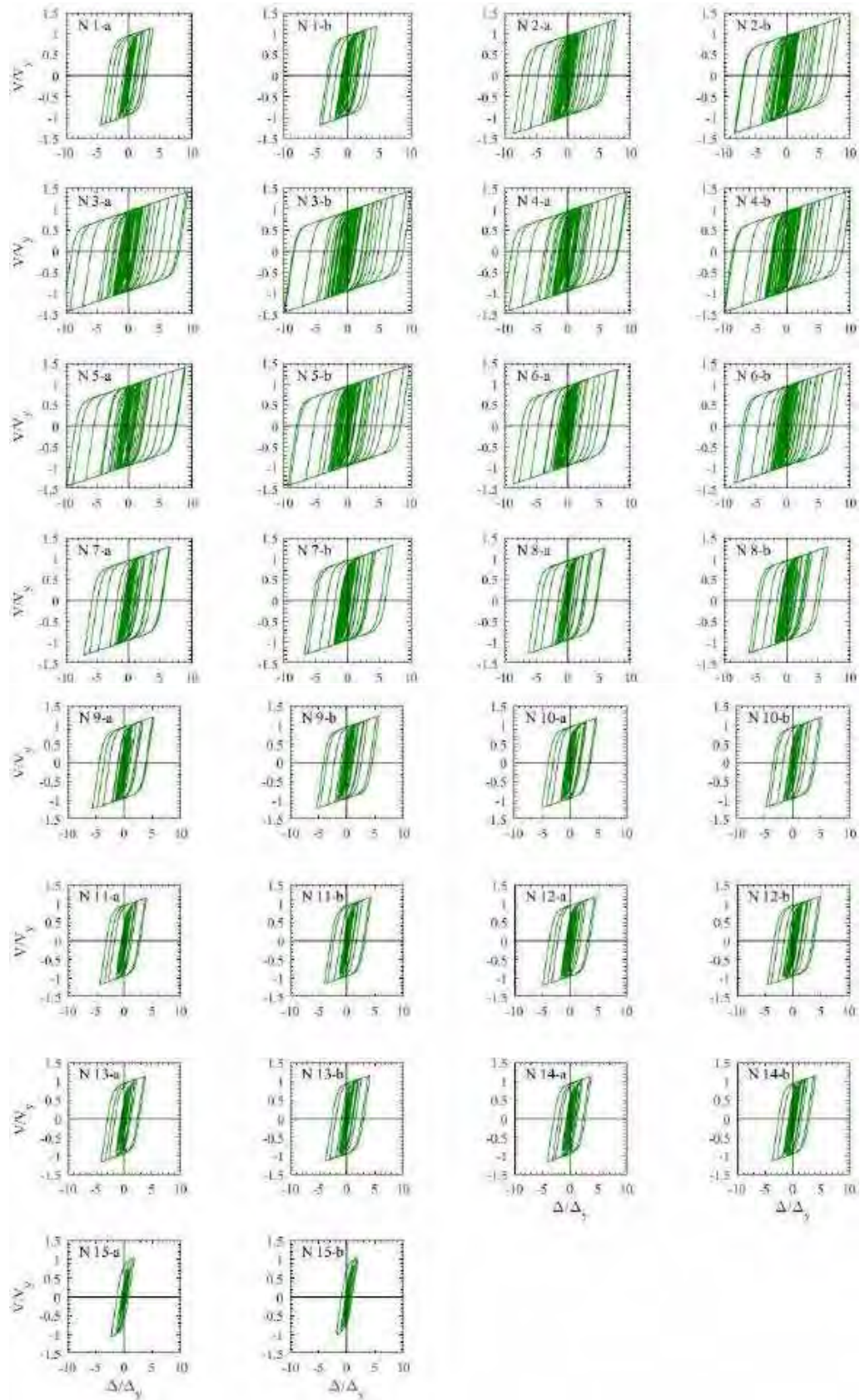


Figura G.138. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración MI15-B

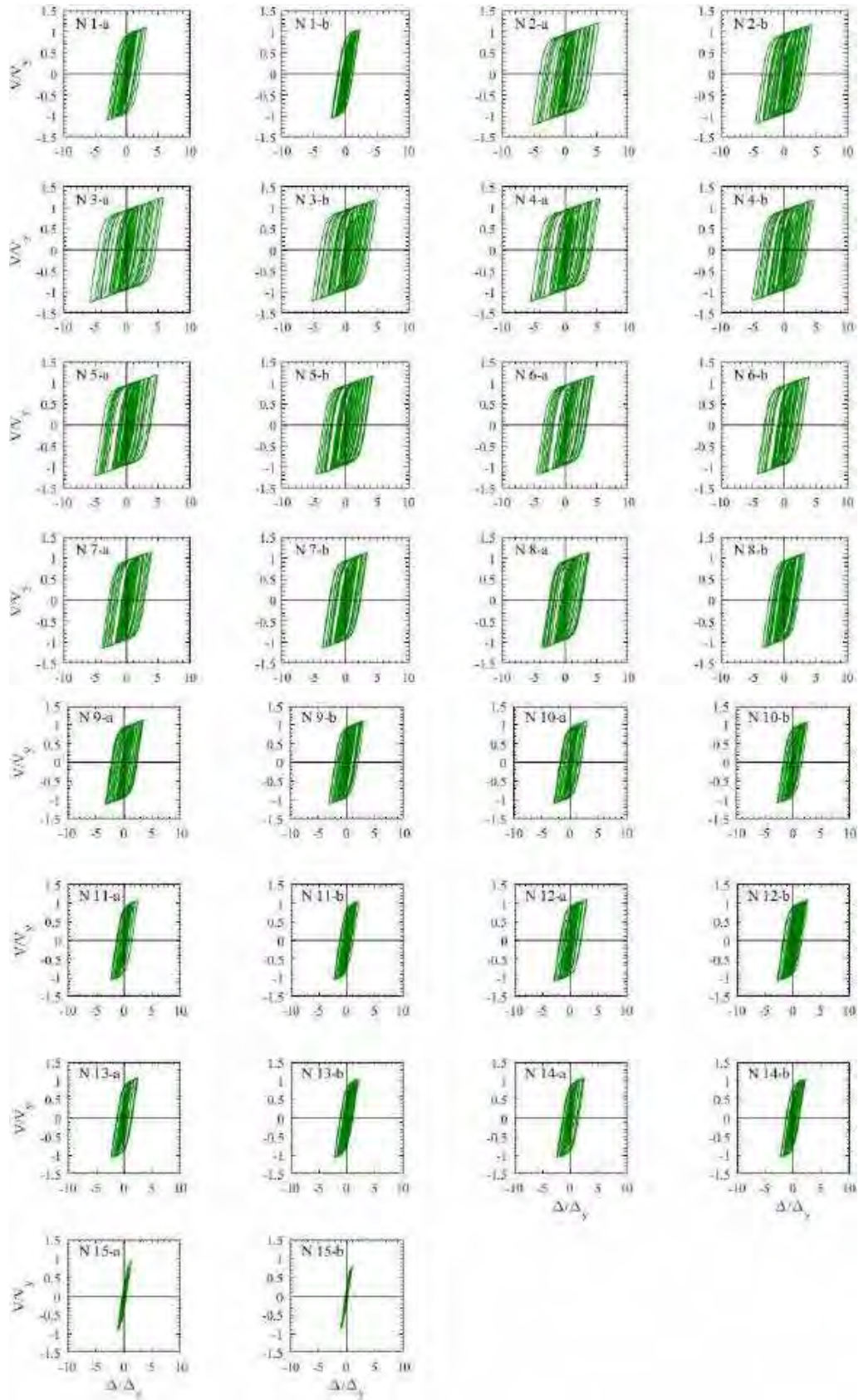


Figura G.139. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CU80-A (2017)

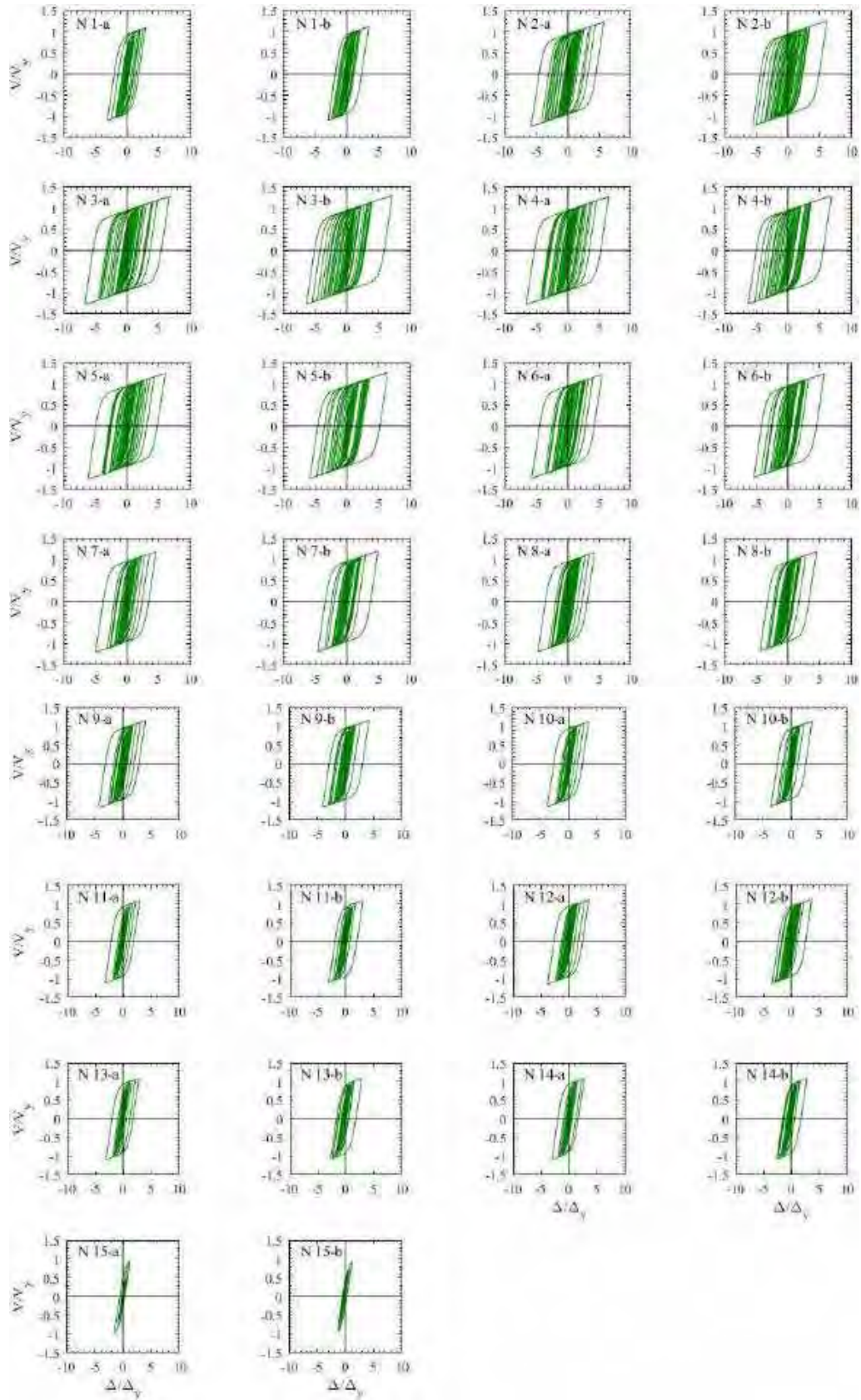


Figura G.140. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CU80-B (2017)

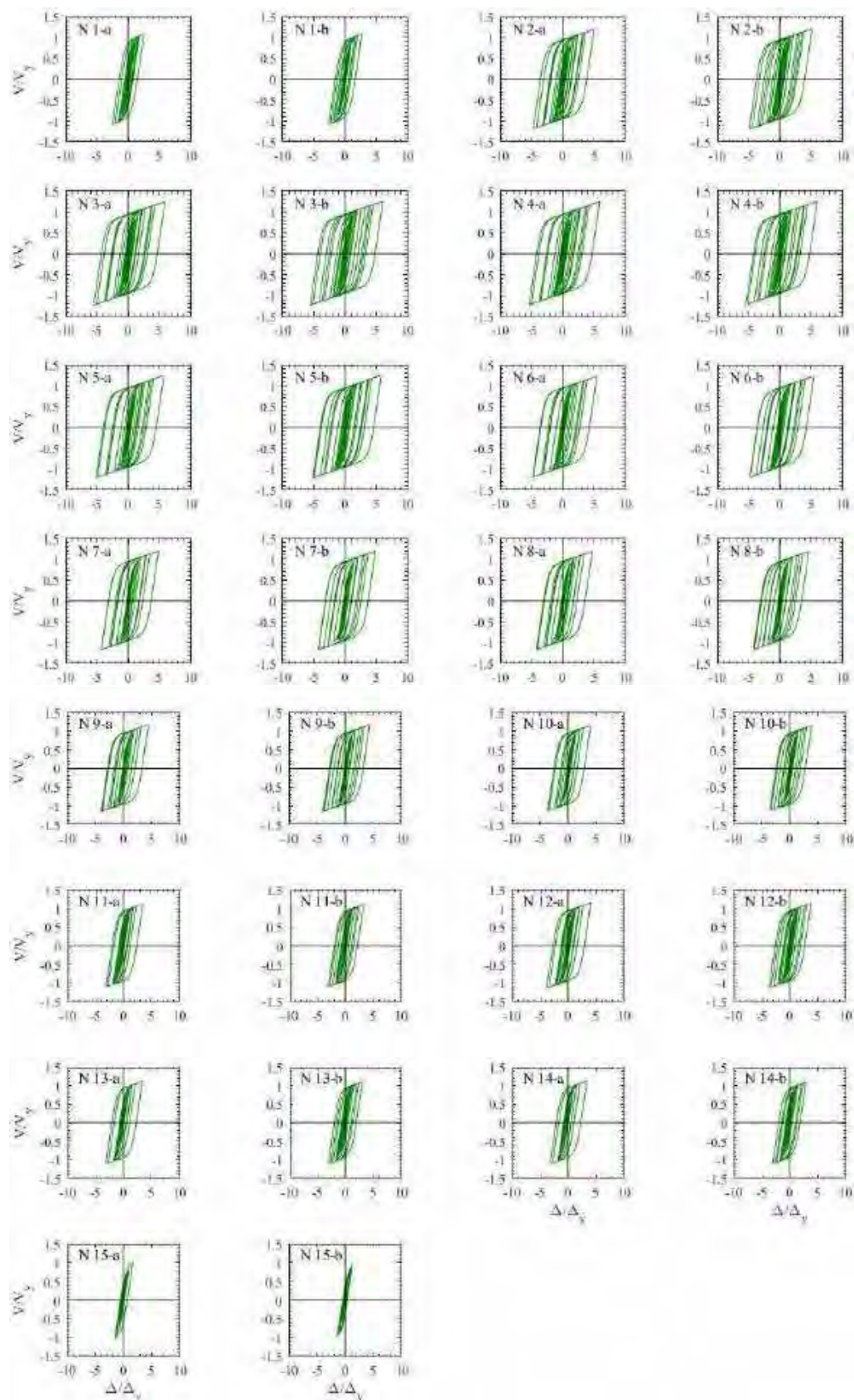


Figura G.141. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DX37-A (2017)

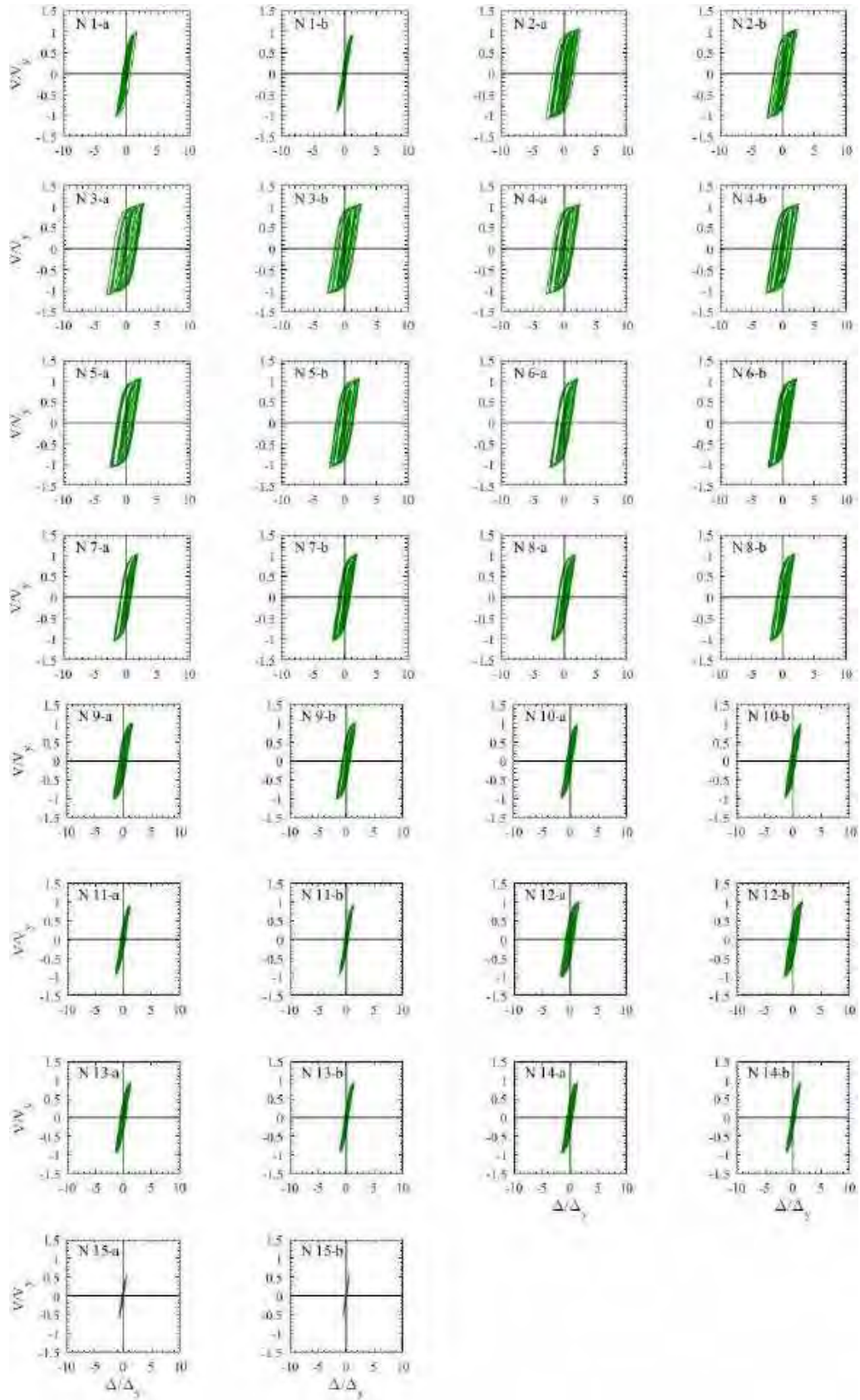


Figura G.142. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración DX37-B (2017)

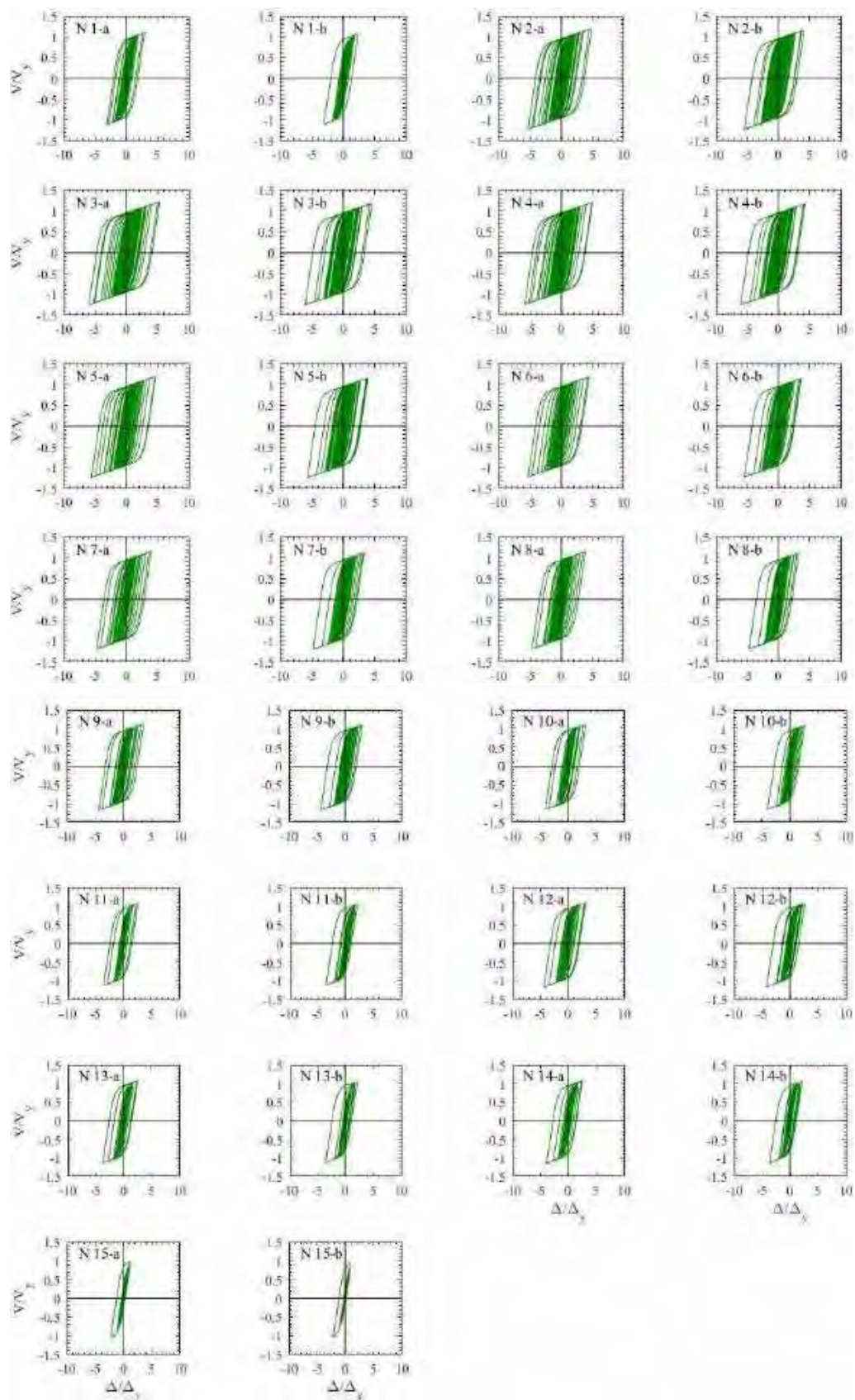


Figura G.143. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración JC54-A (2017)

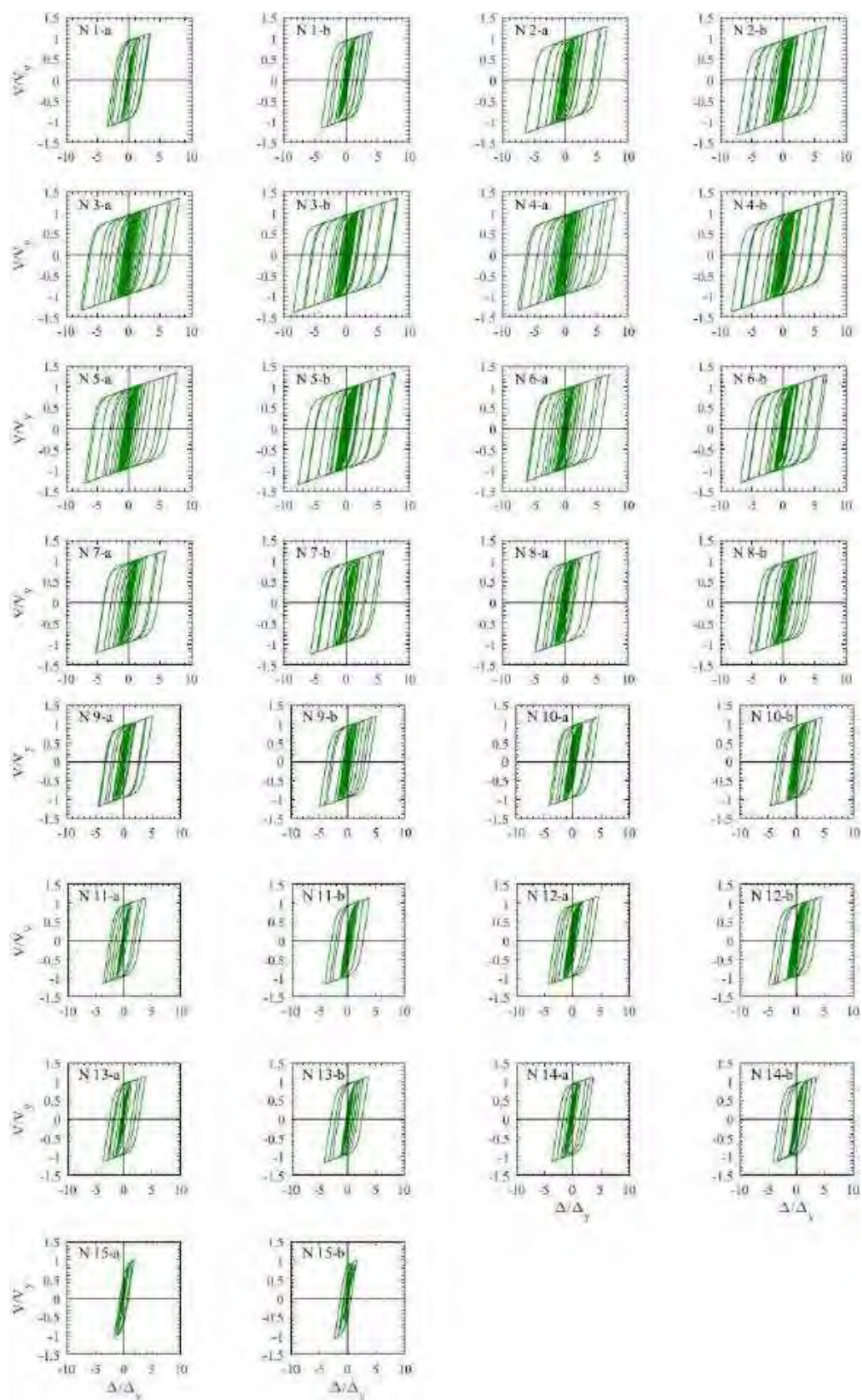
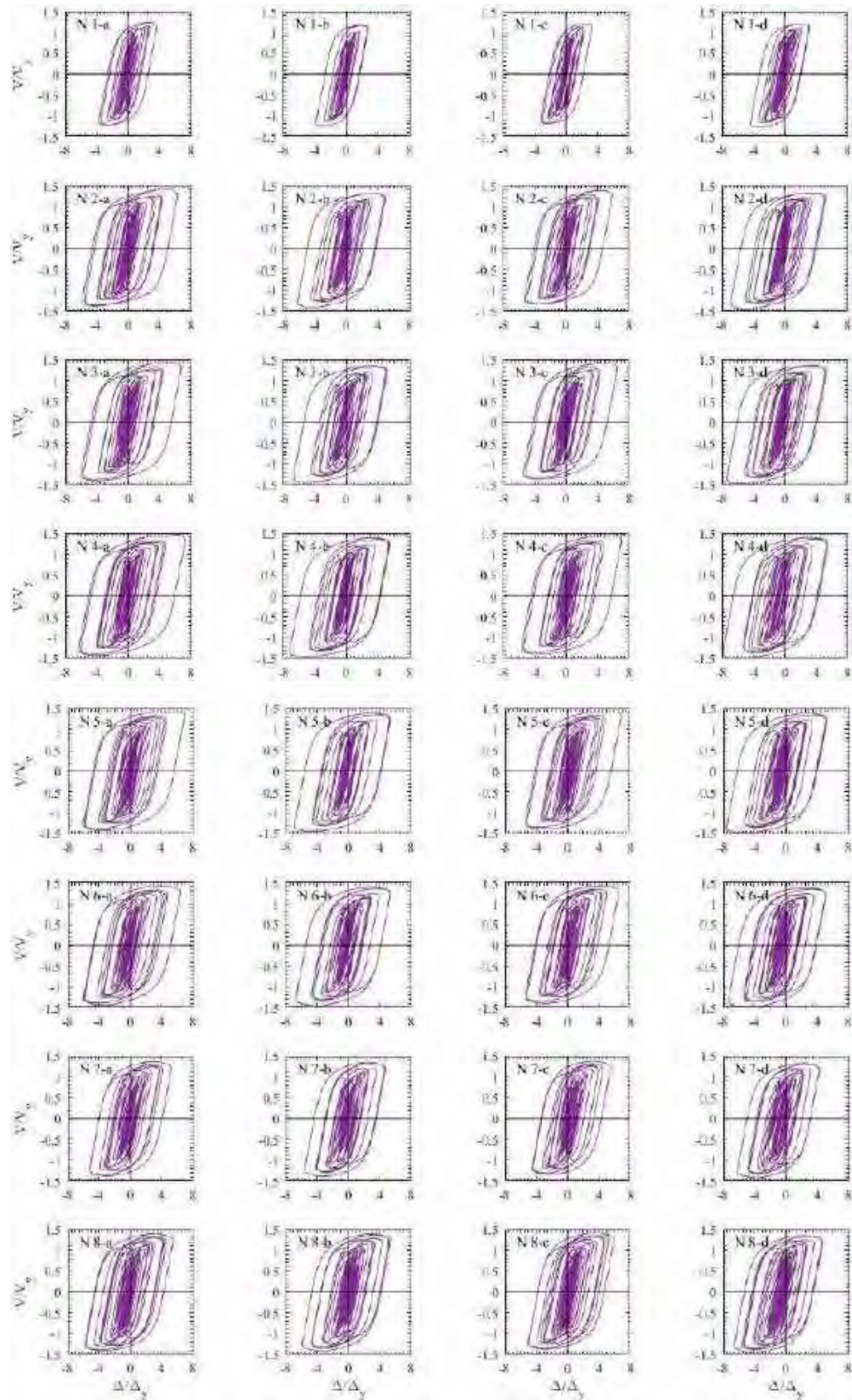


Figura G.144. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.2.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB



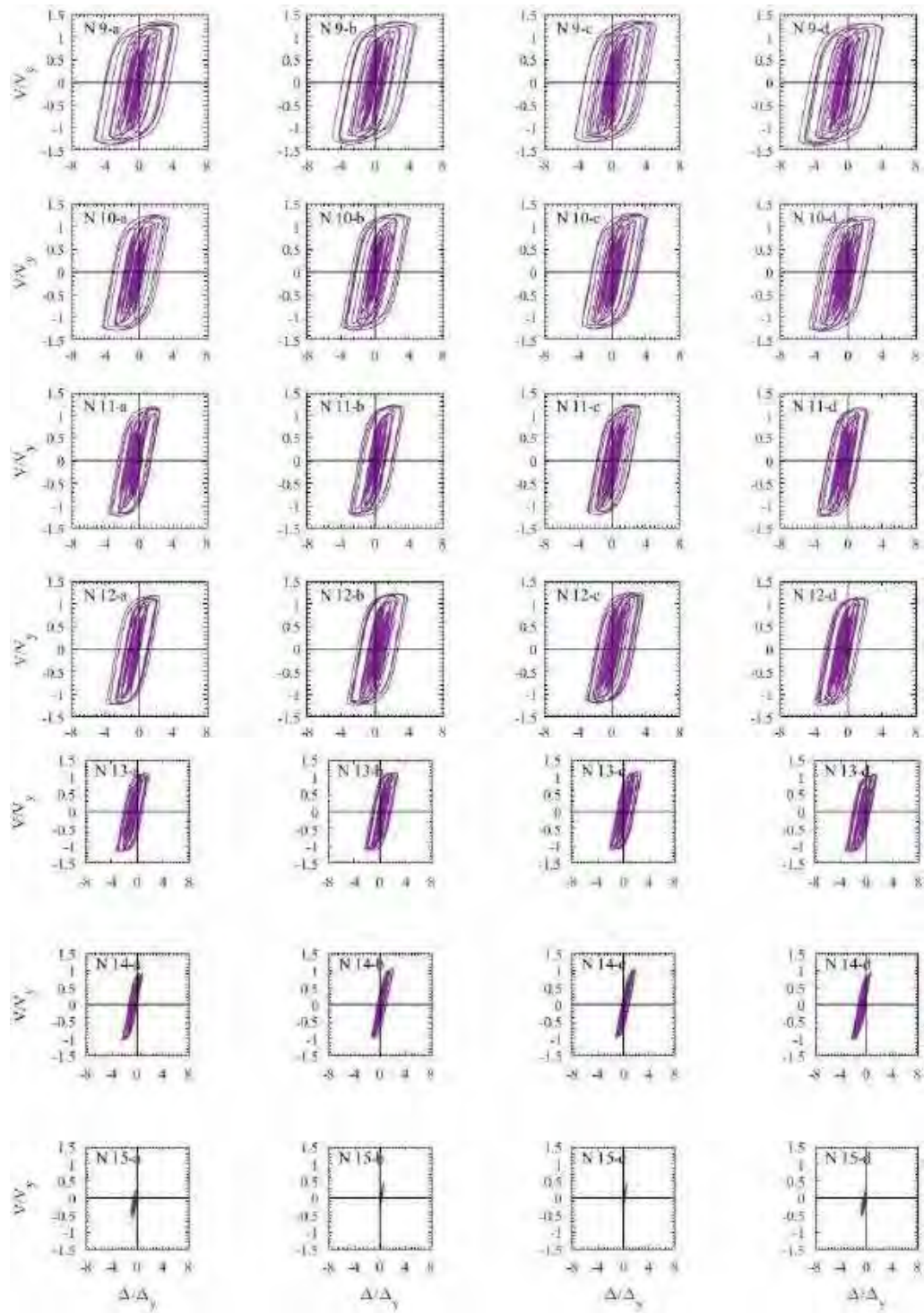
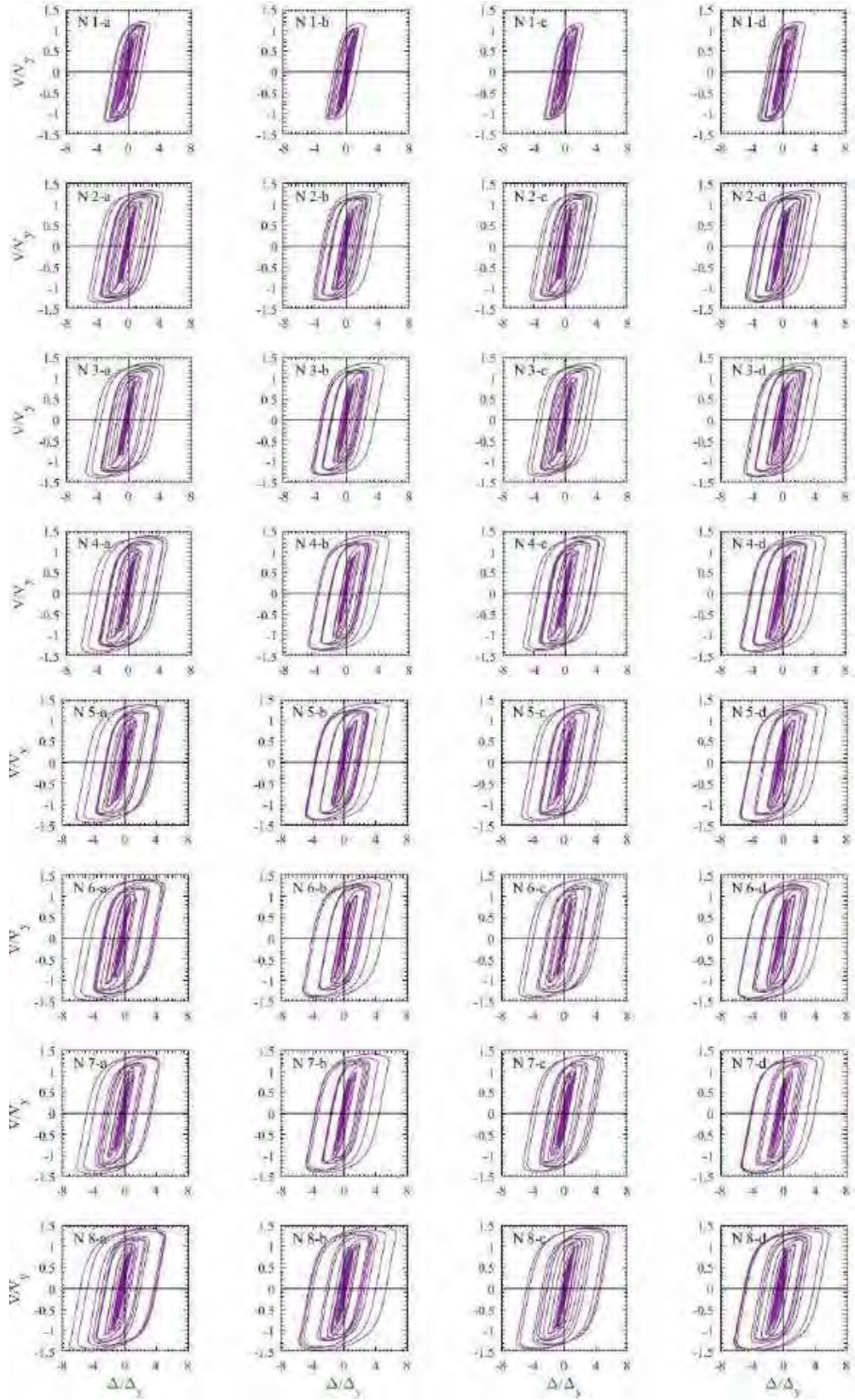


Figura G.145. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CM-A



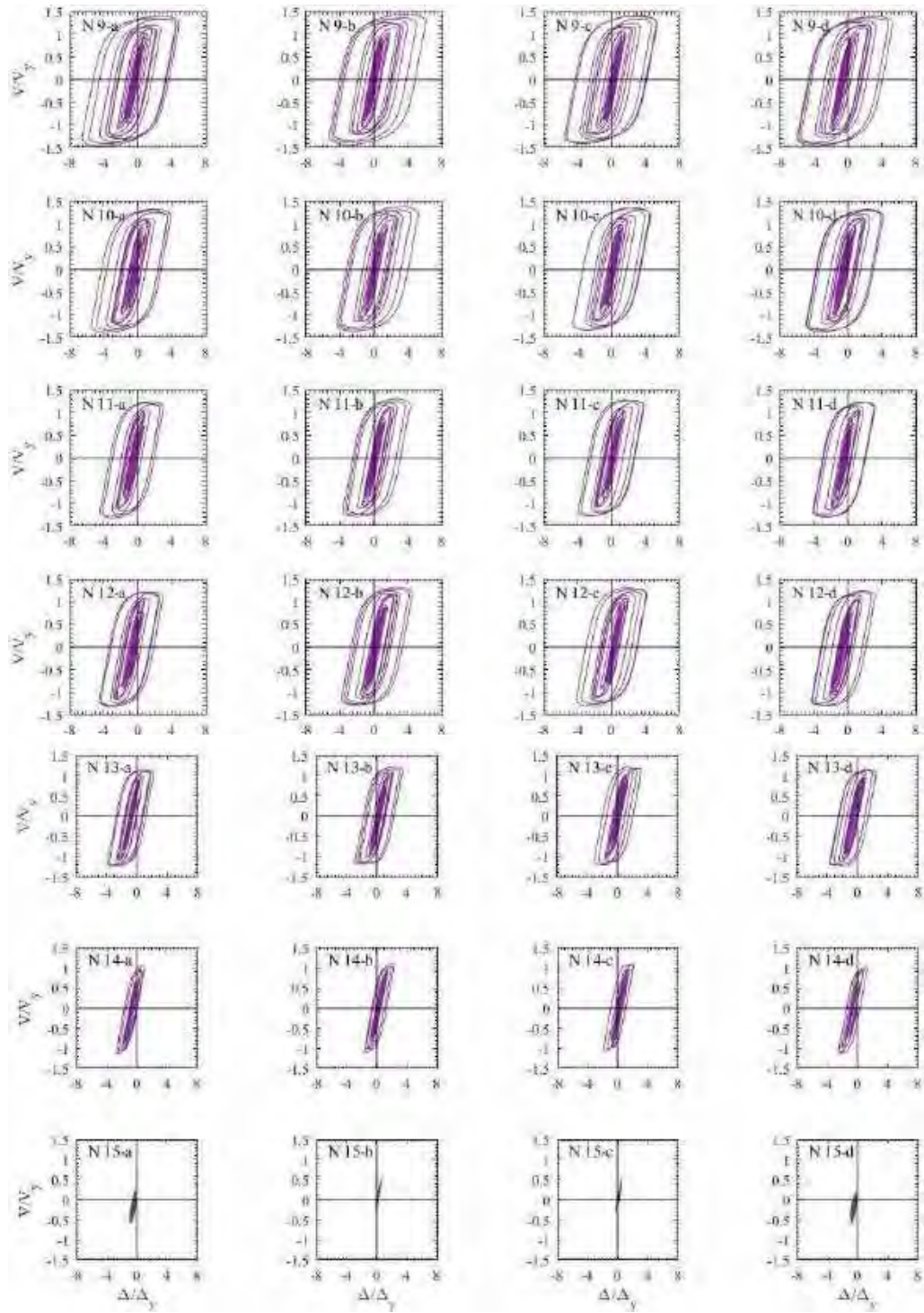
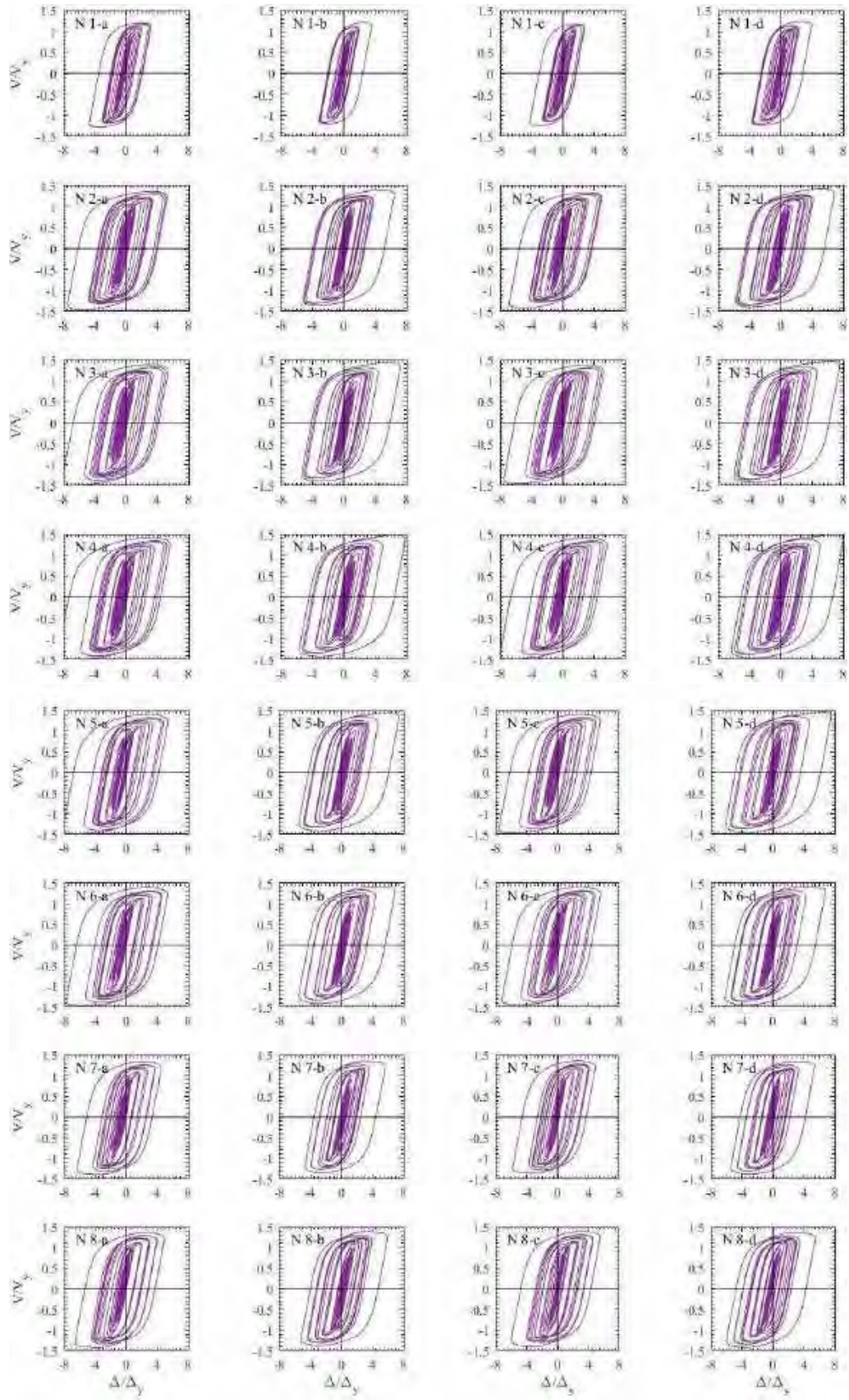


Figura G.146. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CM-B



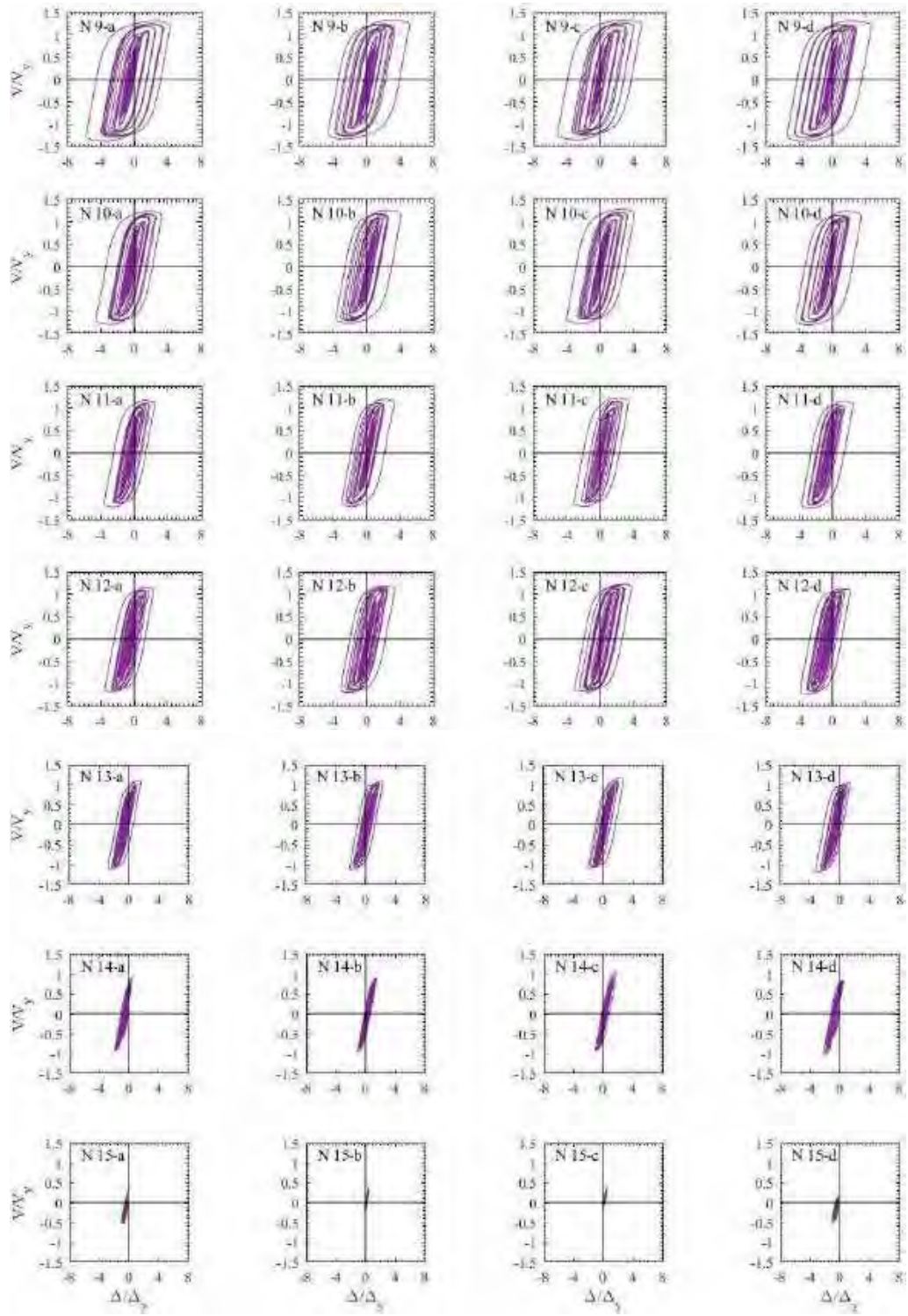
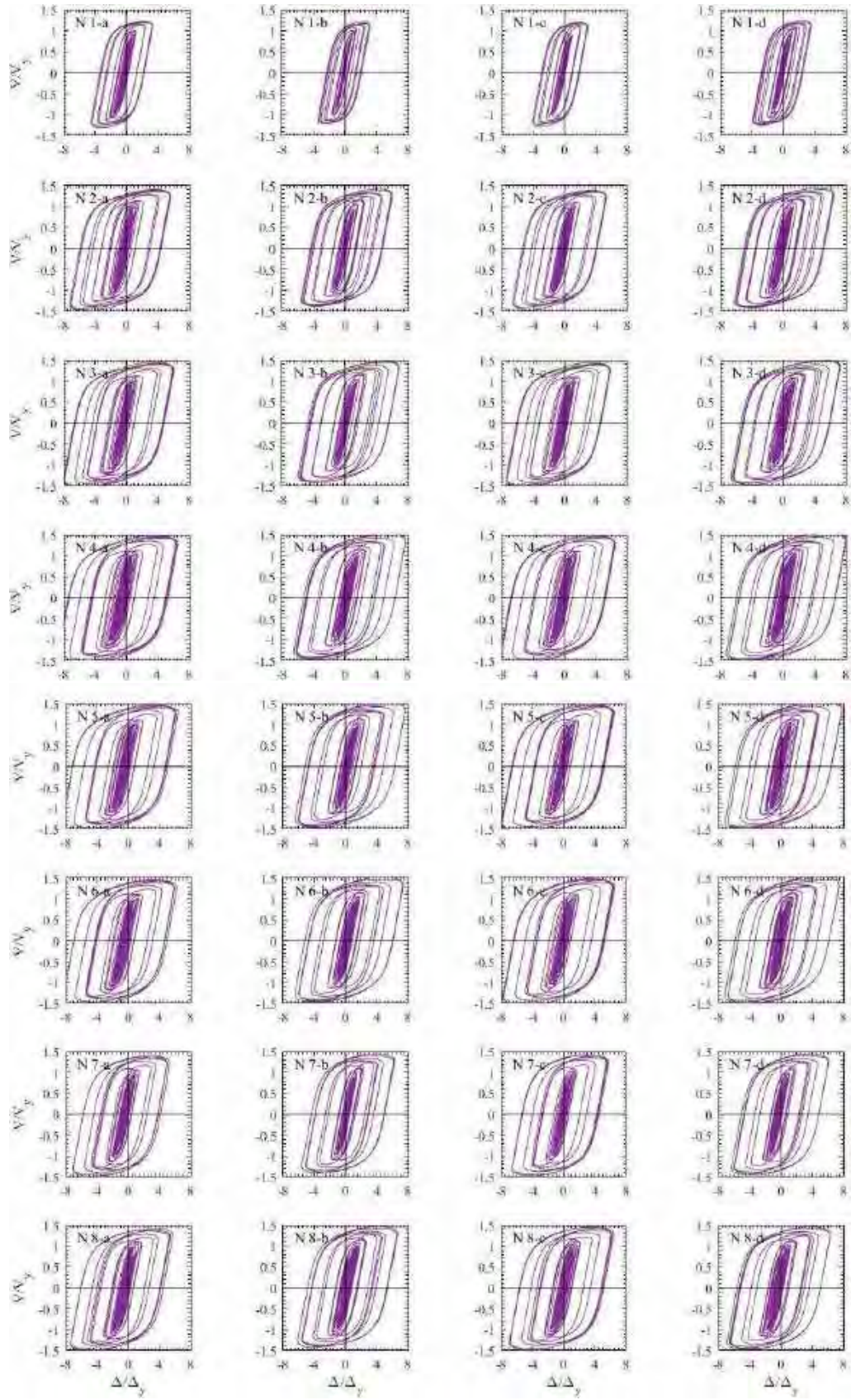


Figura G.147. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DFRO-A



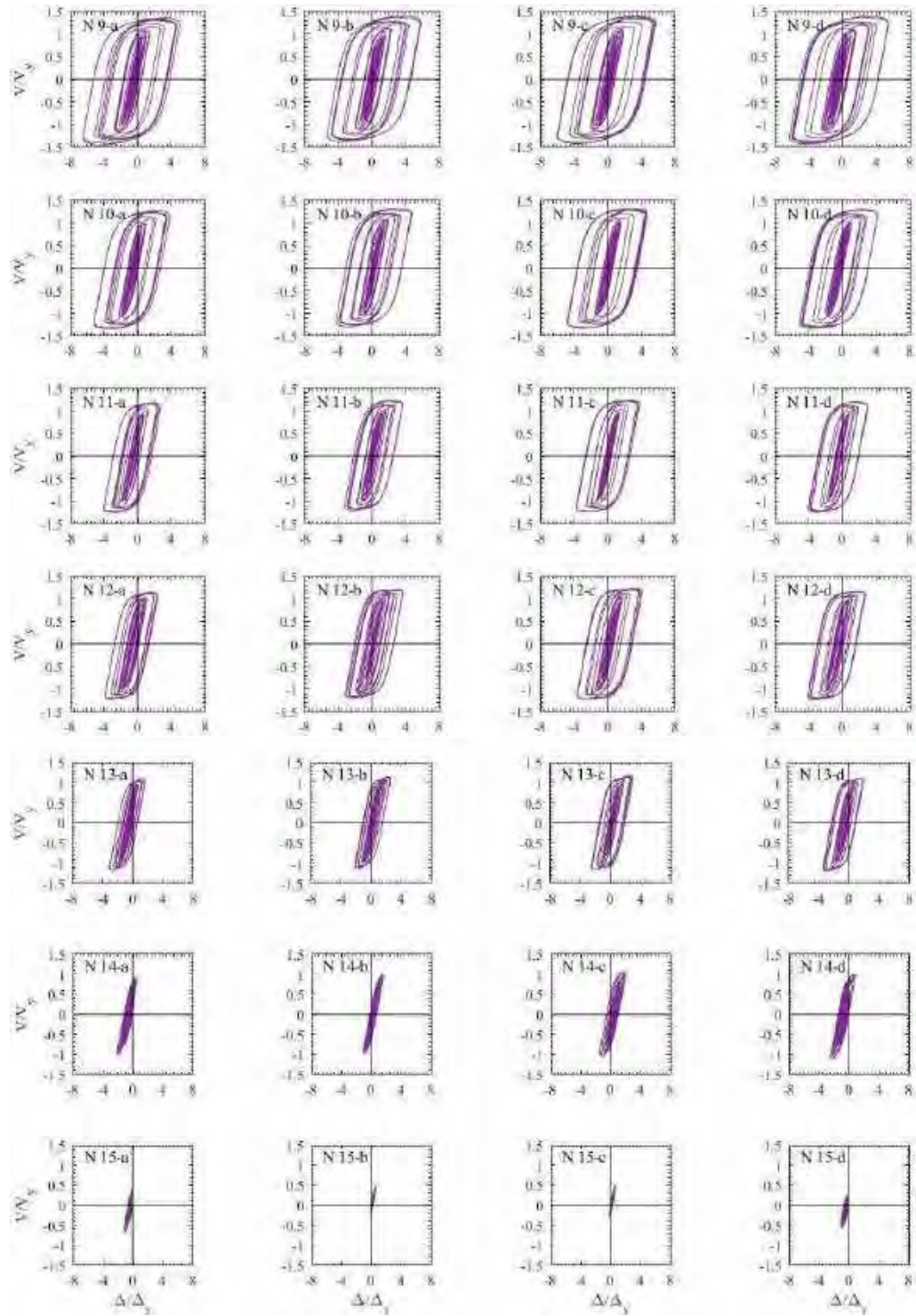
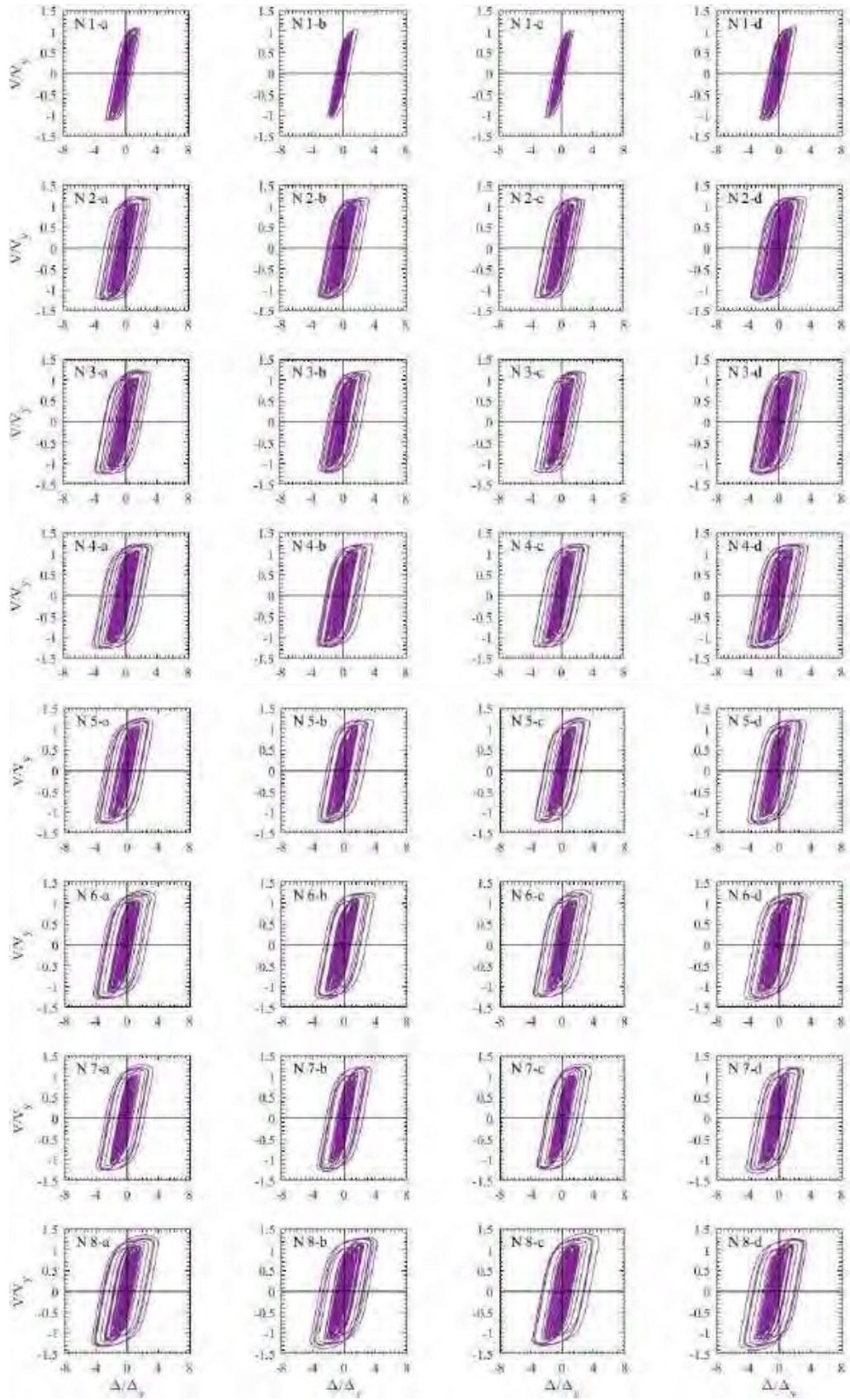


Figura G.148. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DFRO –B



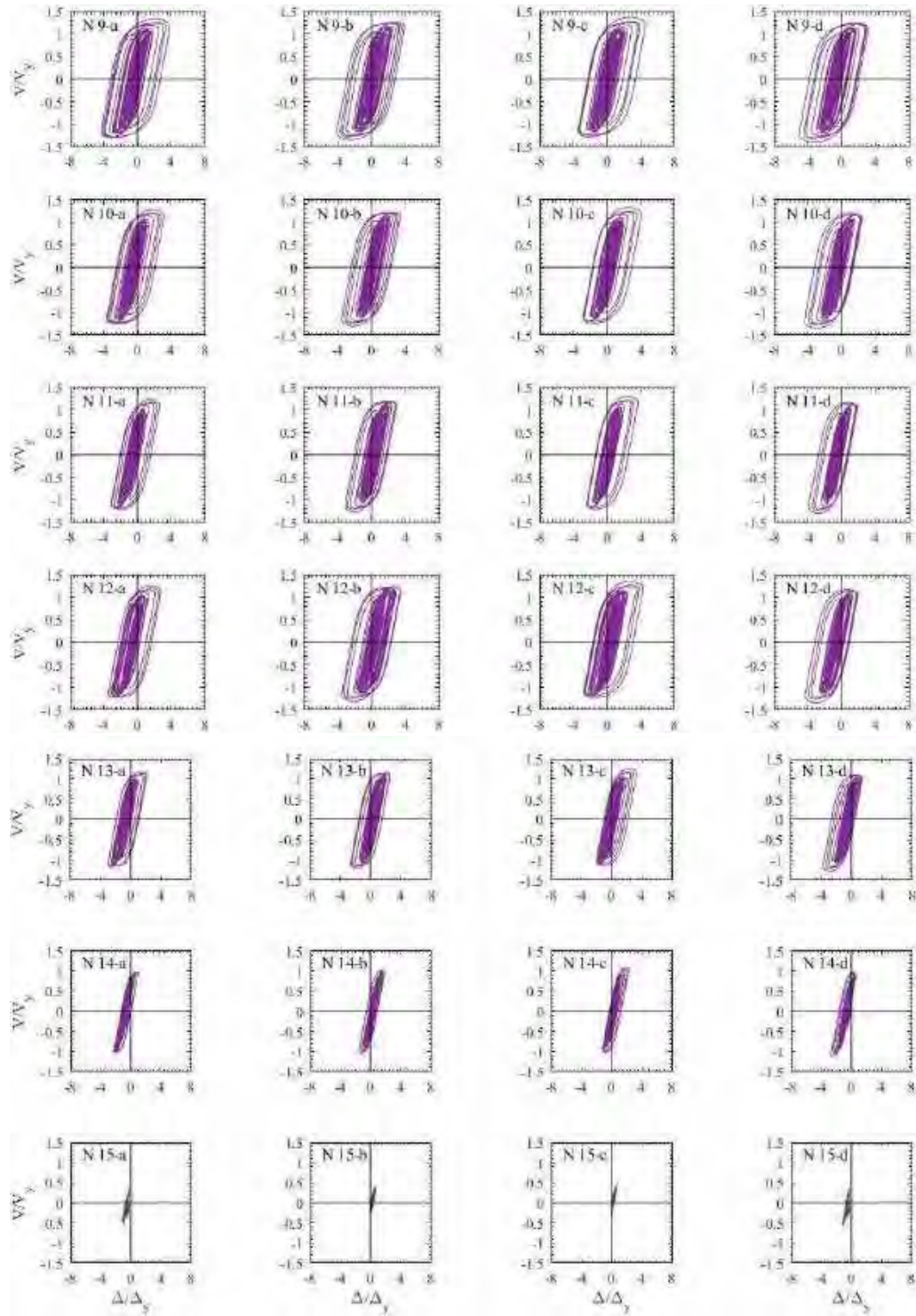
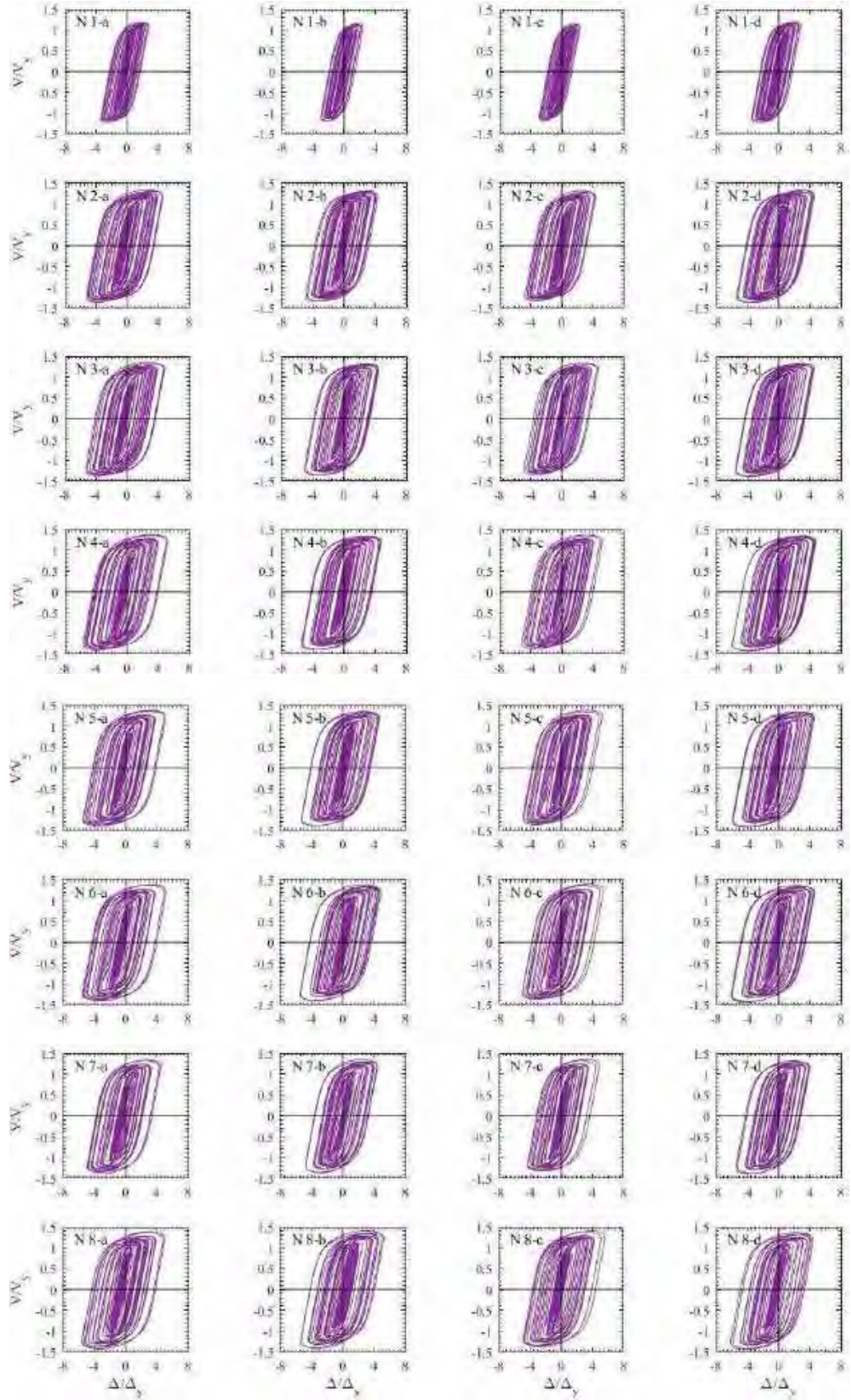


Figura G.149. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración IMSR-A



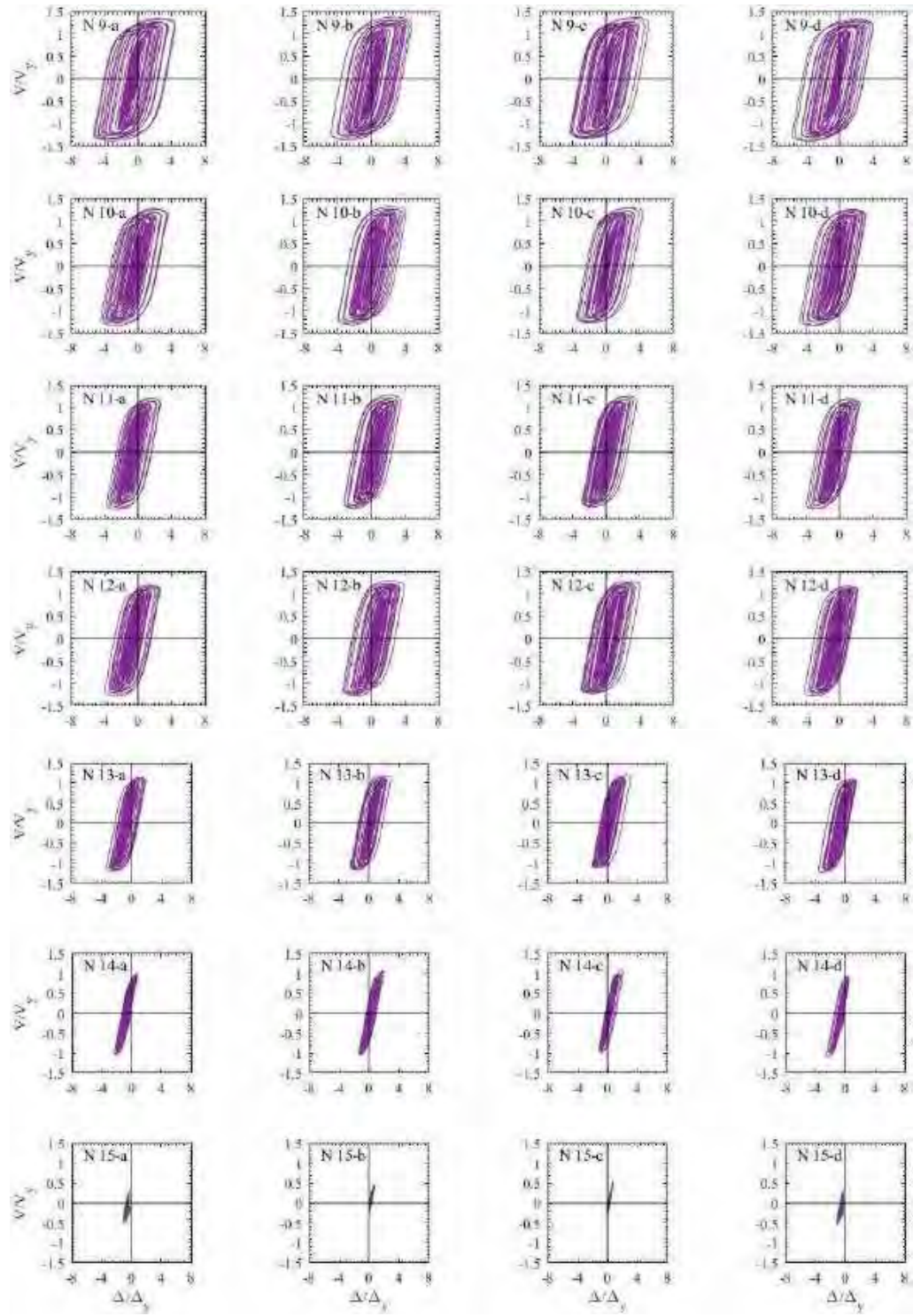
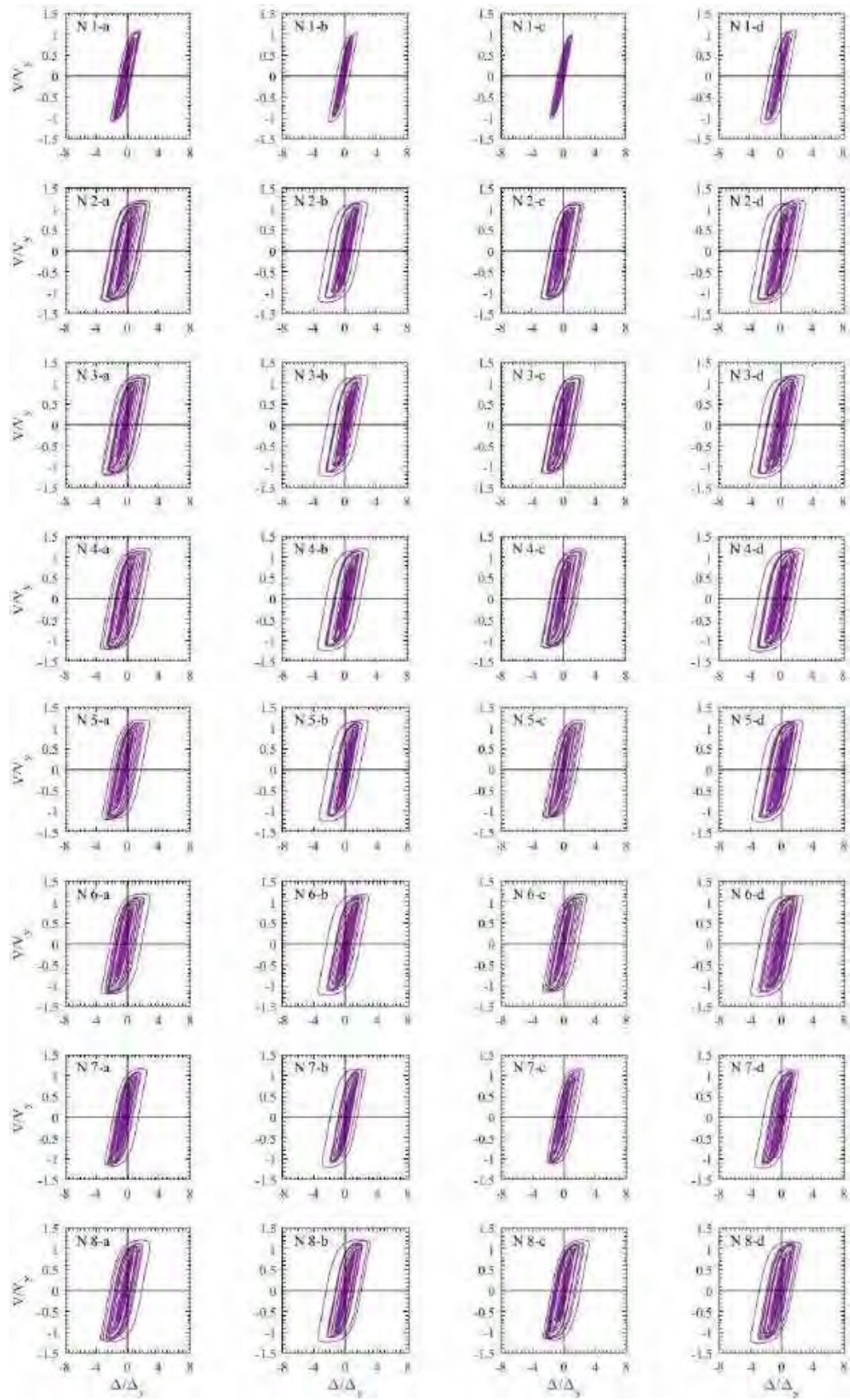


Figura G.150. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración IMSR –B



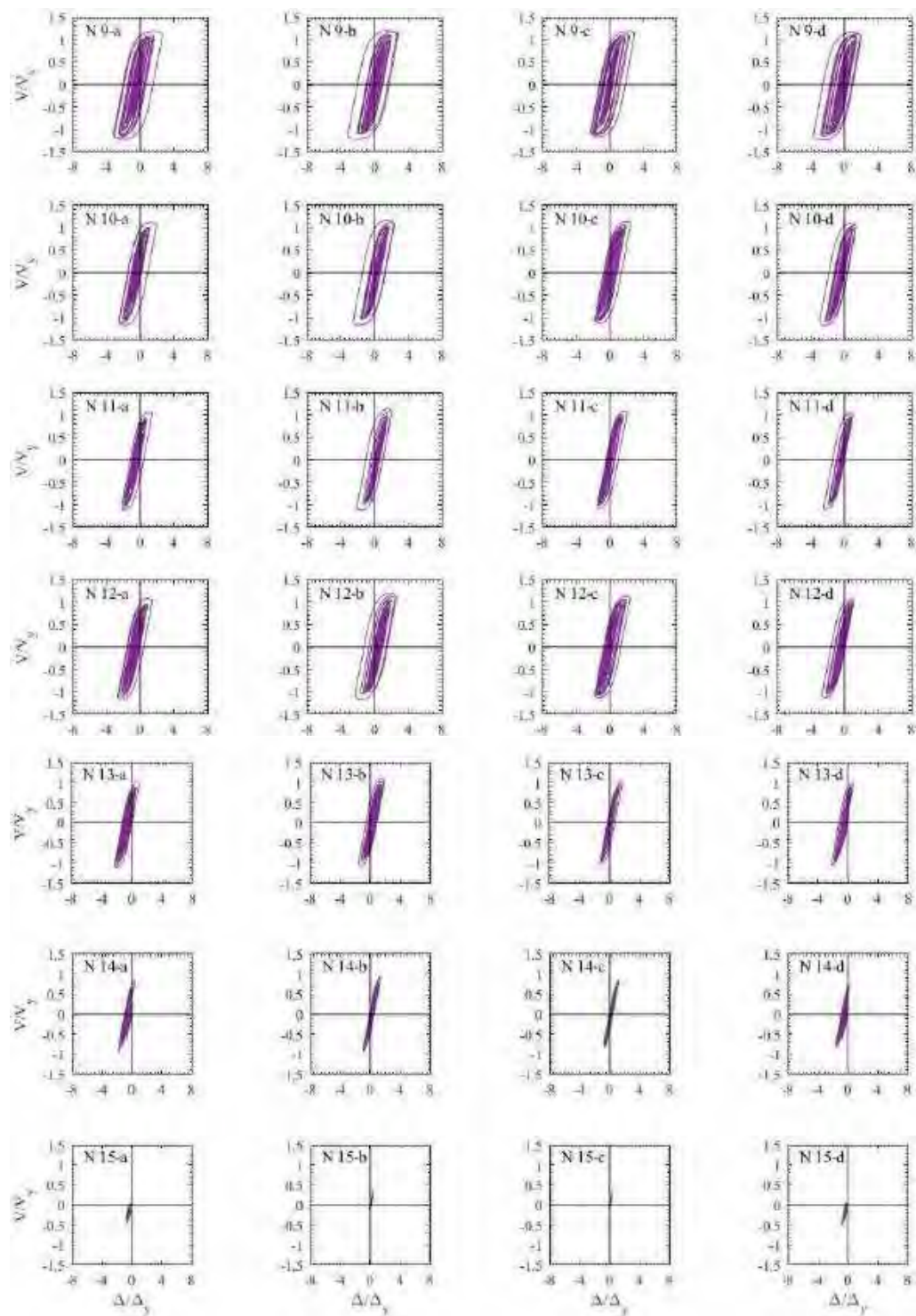
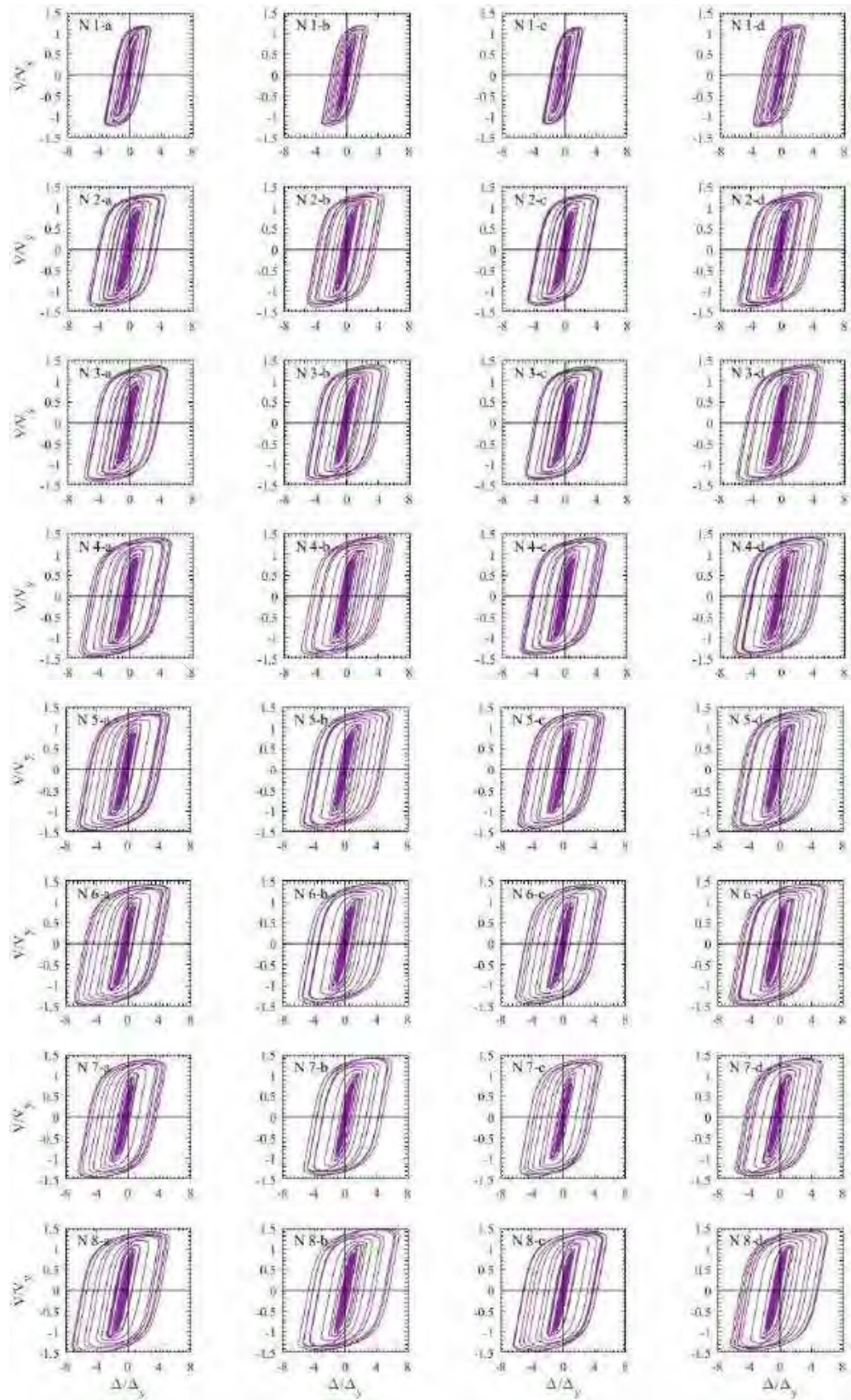


Figura G.151. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SMR-A



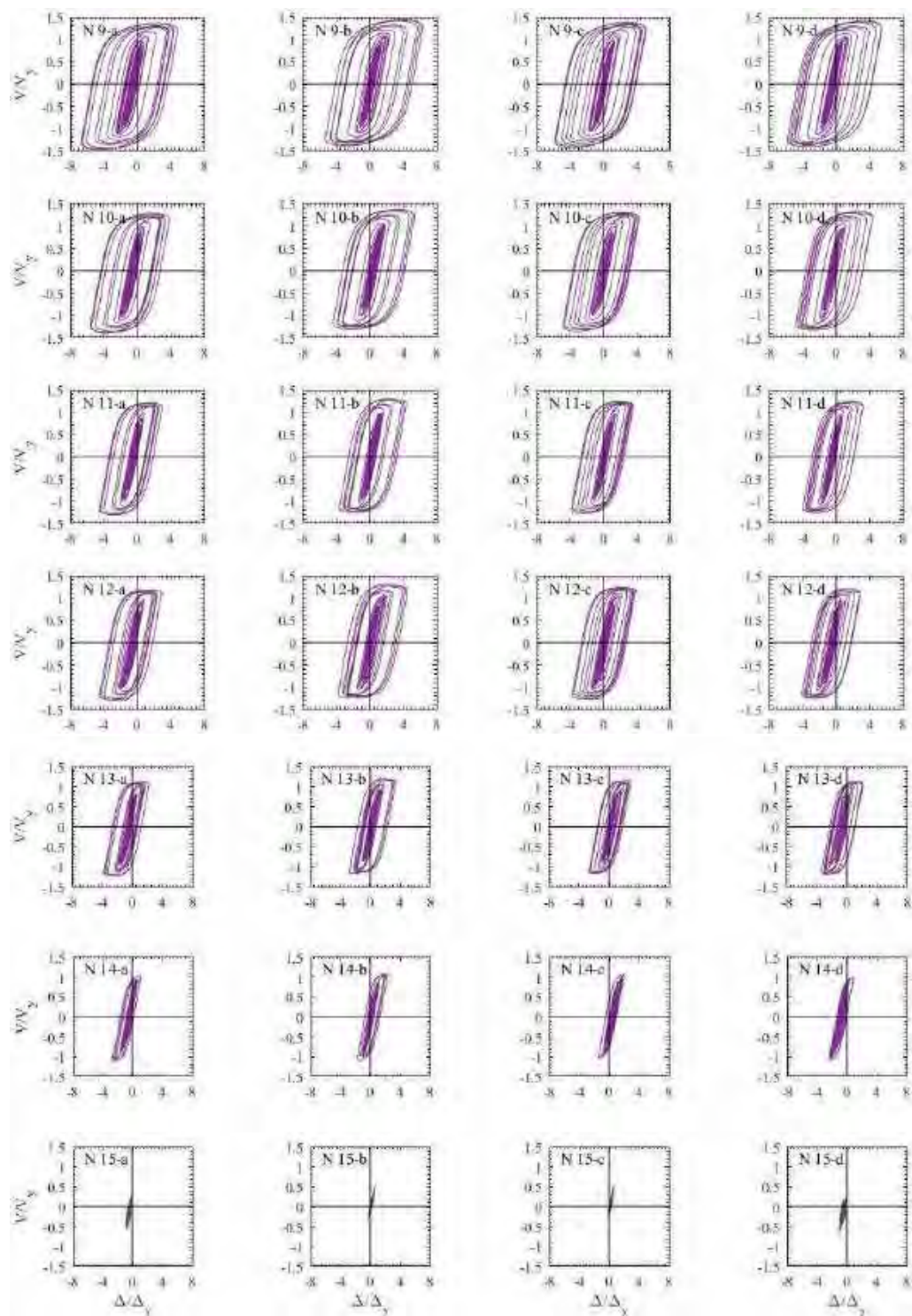
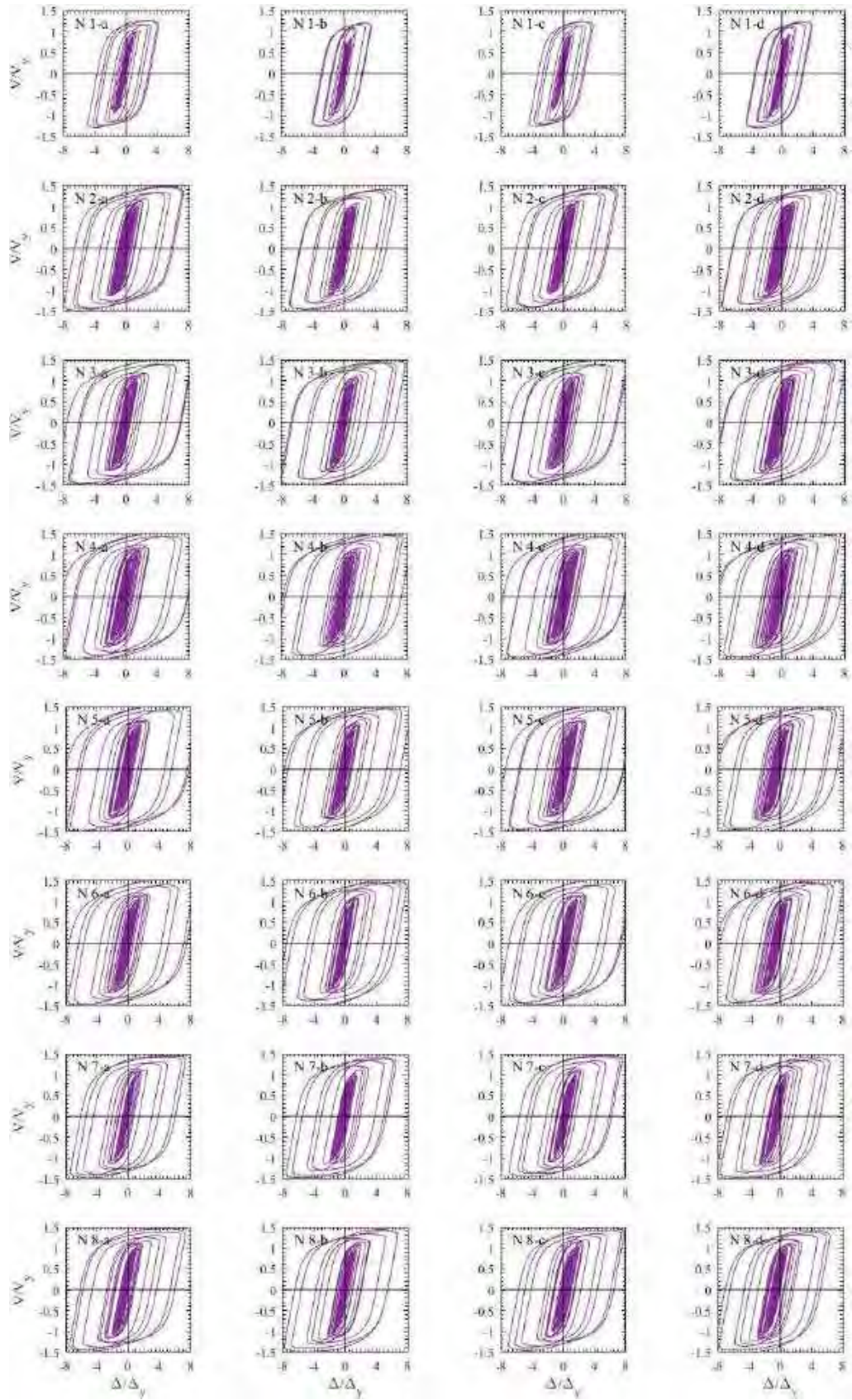


Figura G.152. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SMR –B



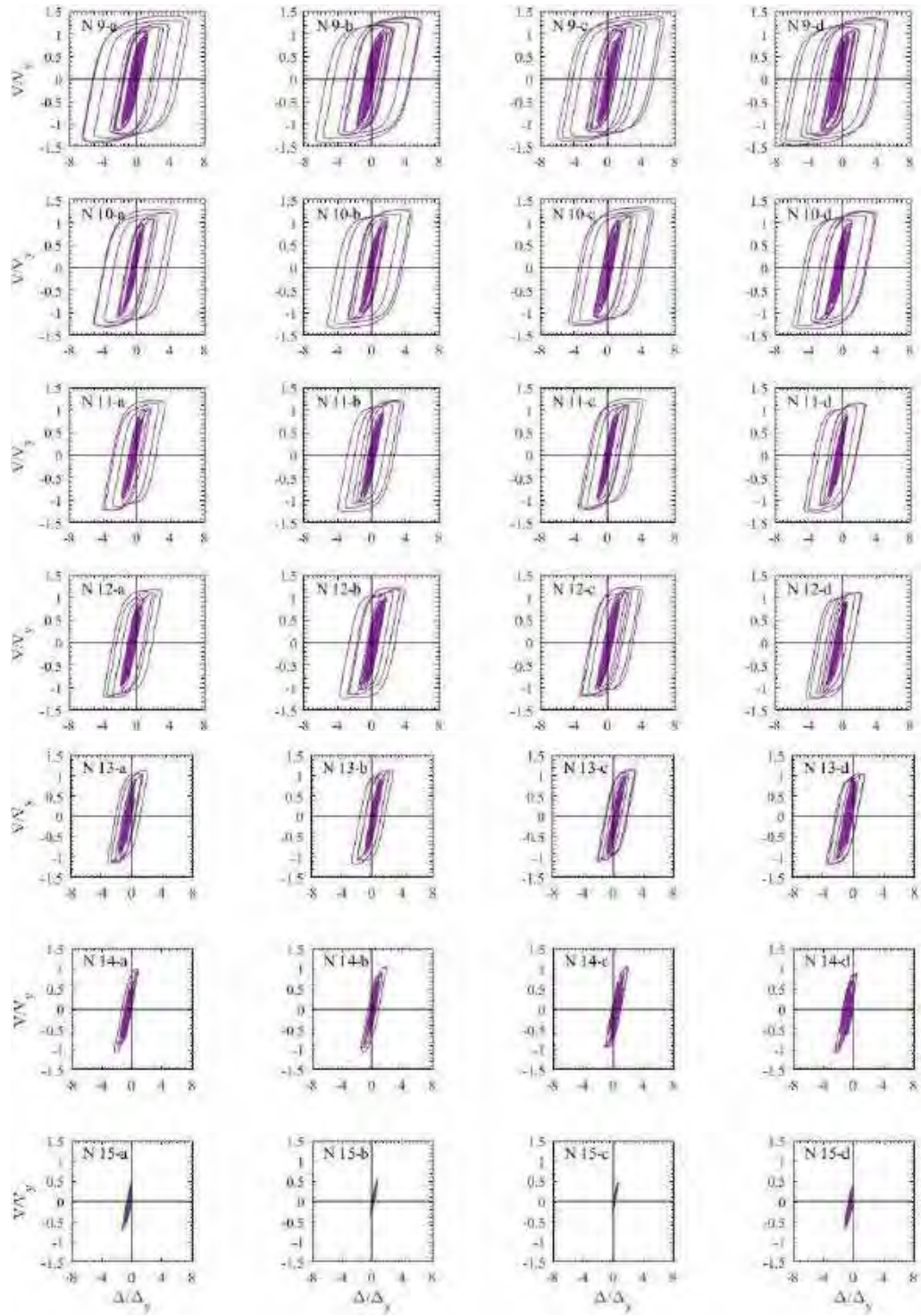
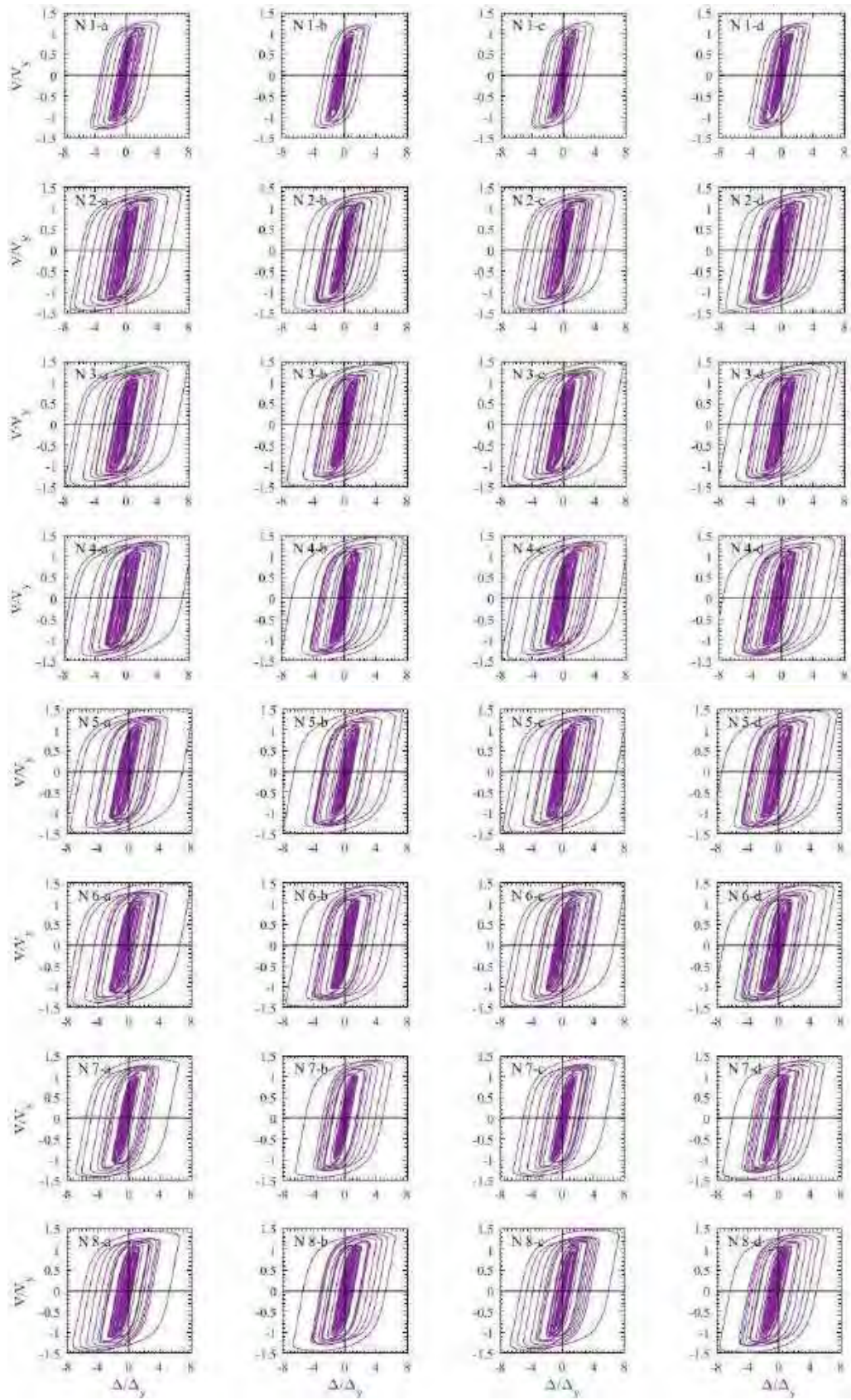


Figura G.153. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración MI15-A



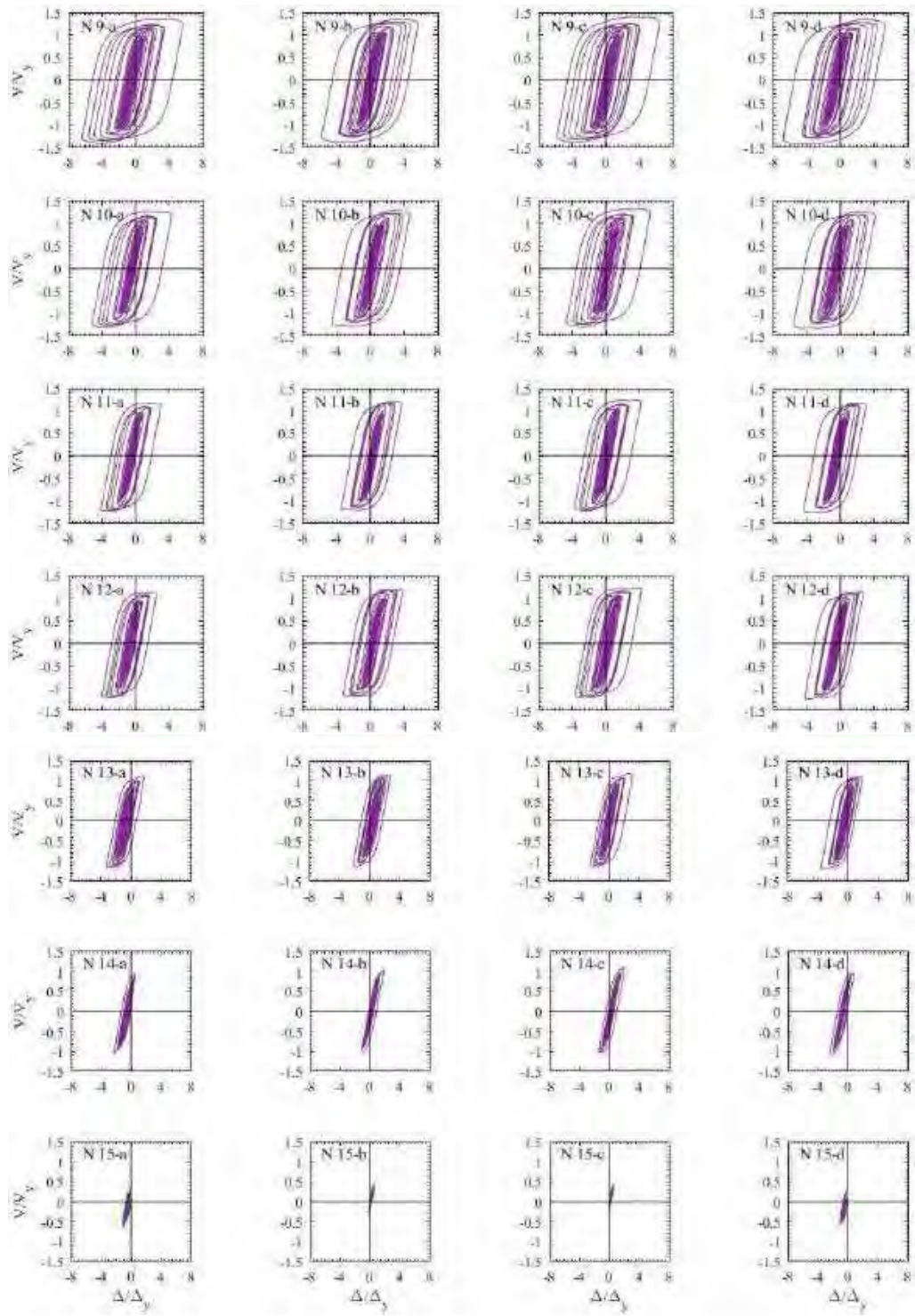
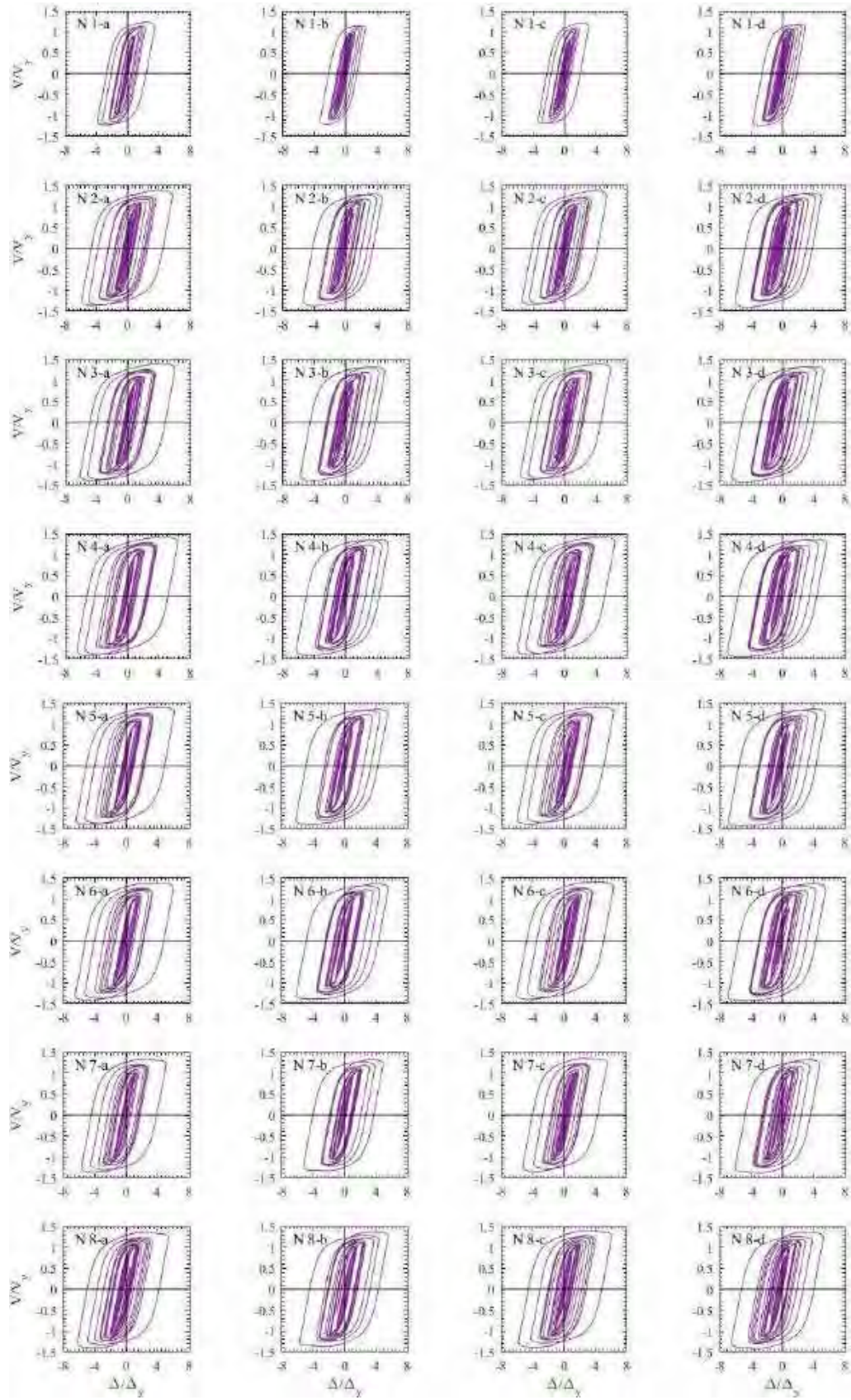


Figura G.154. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración MI15-B



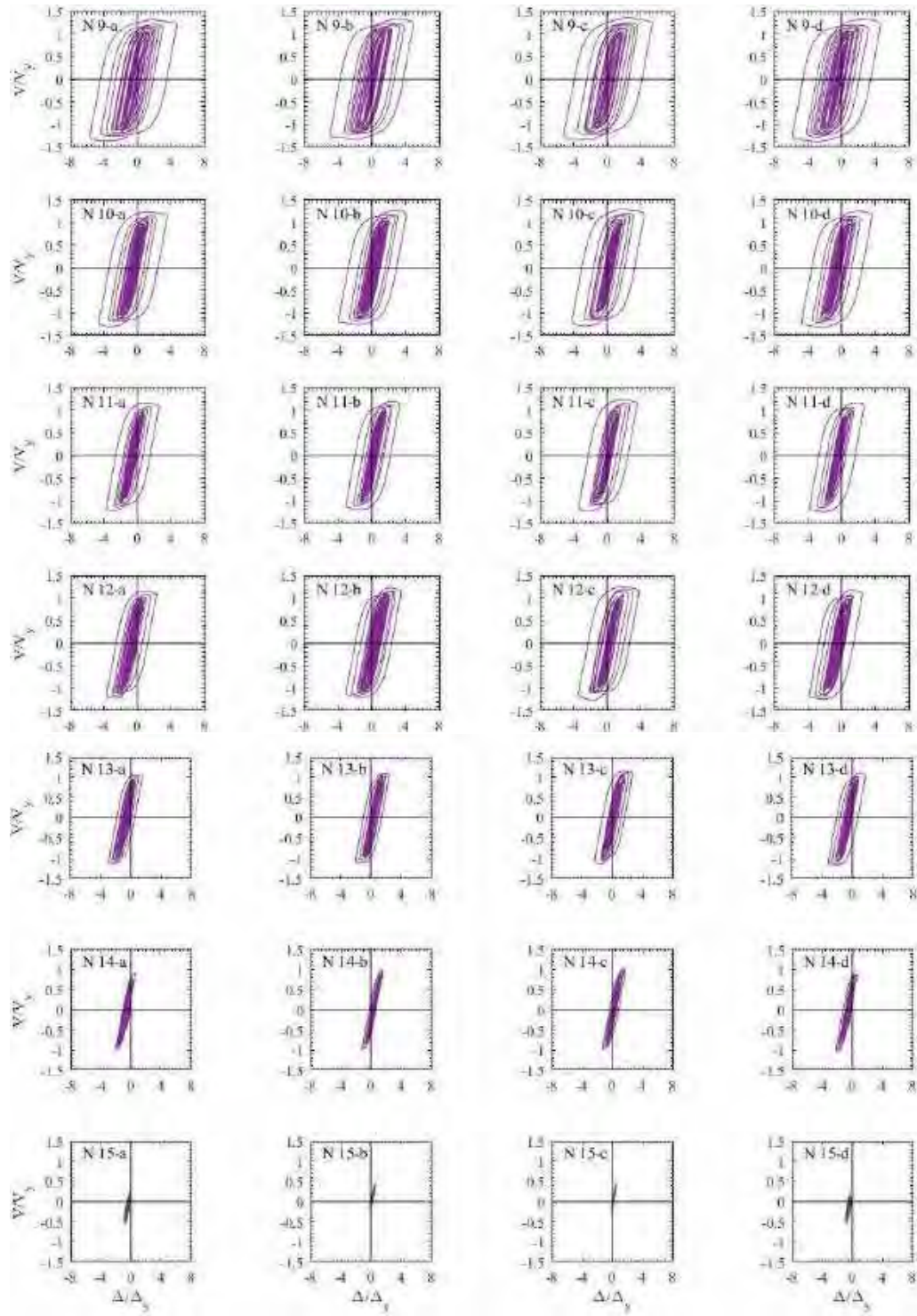
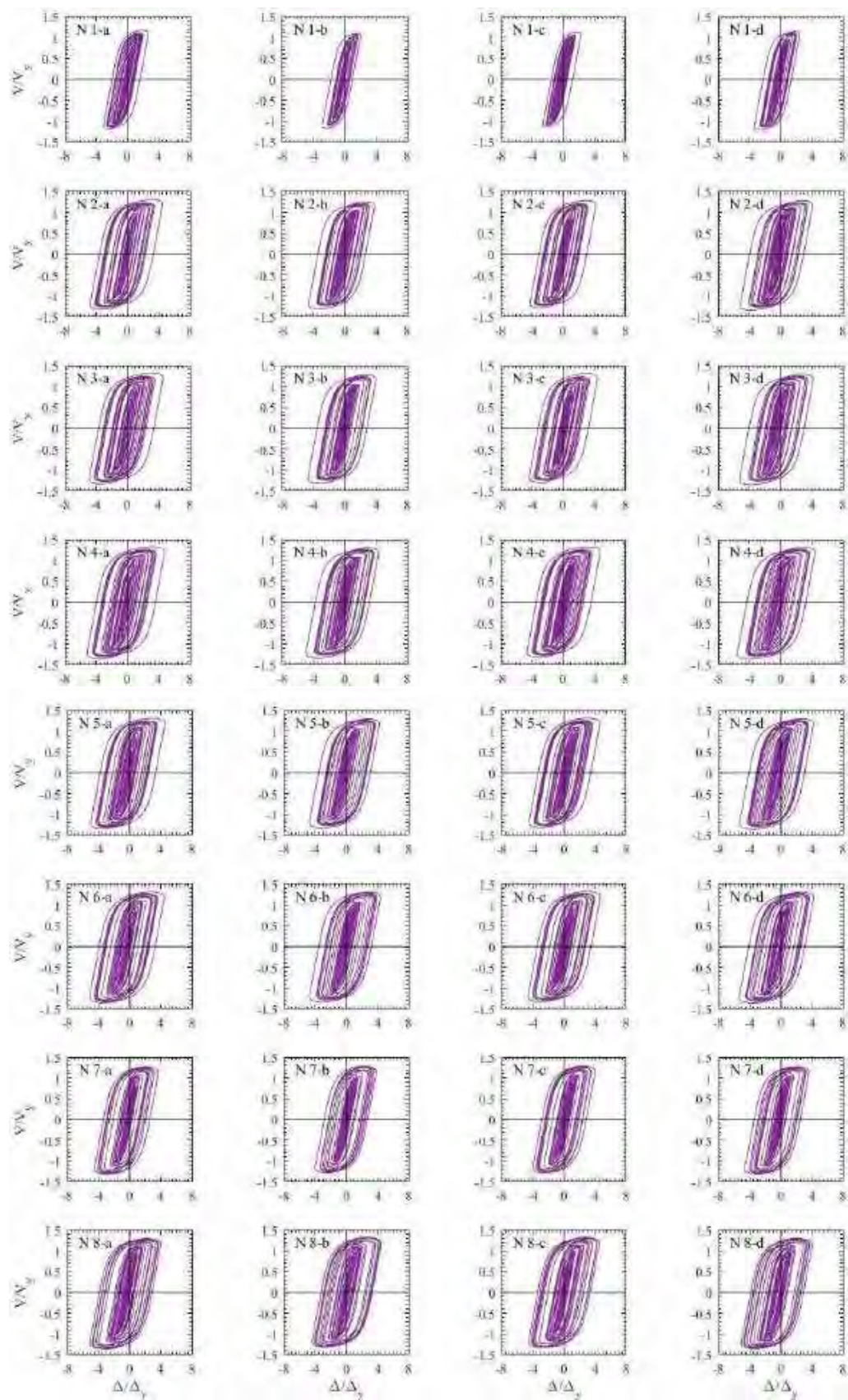


Figura G.155. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CU80-A (2017)



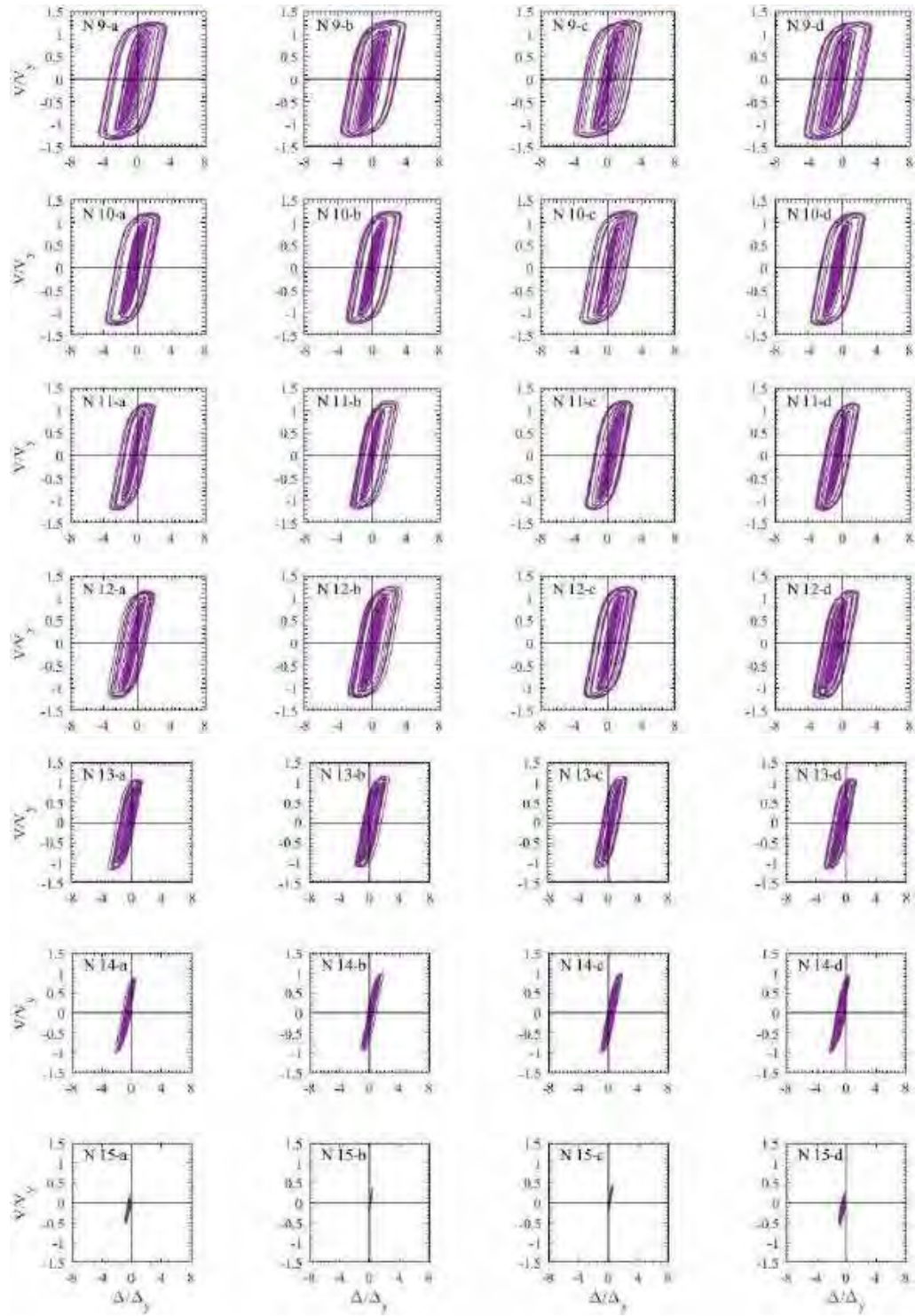
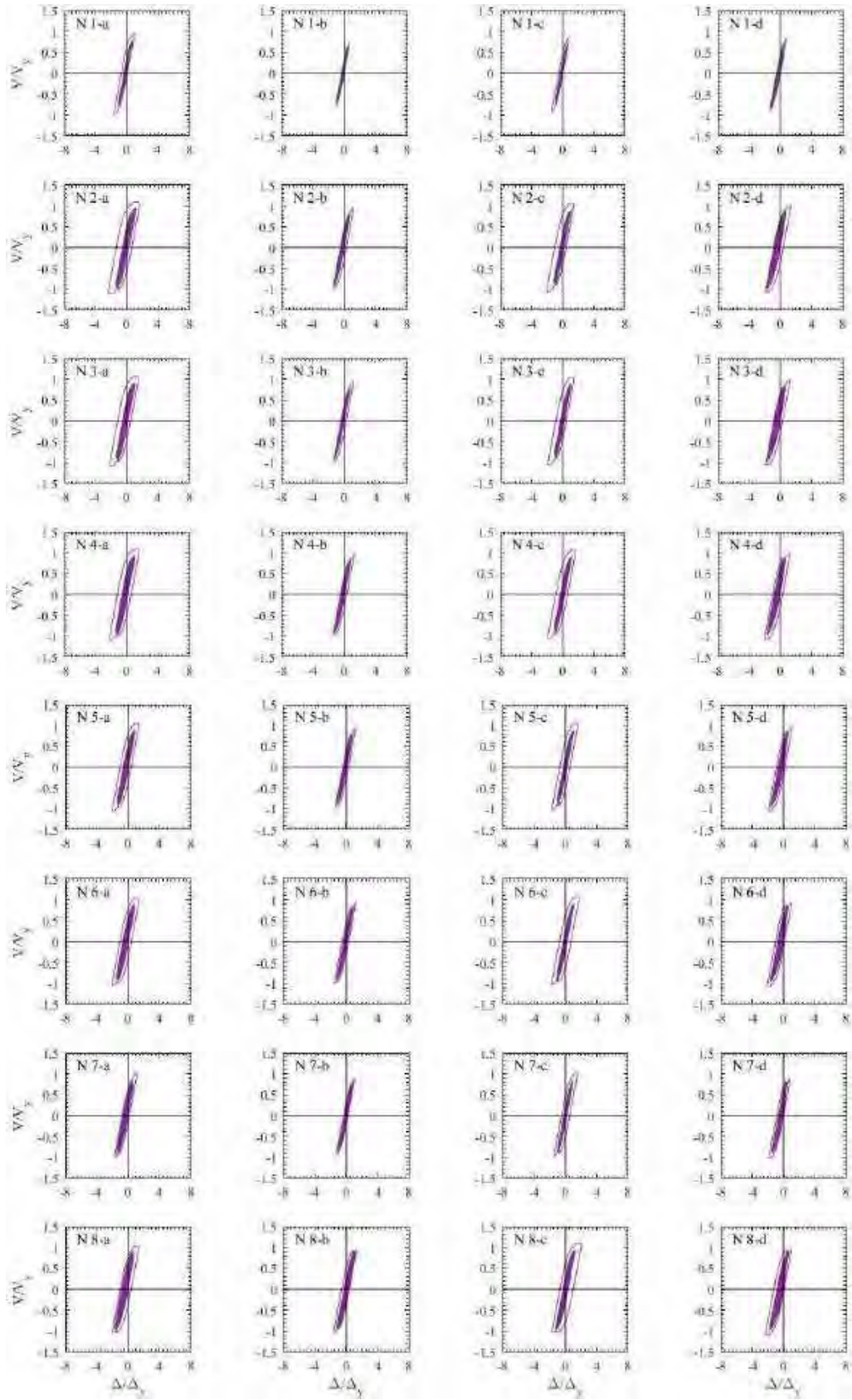


Figura G.156. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CU80-B (2017)



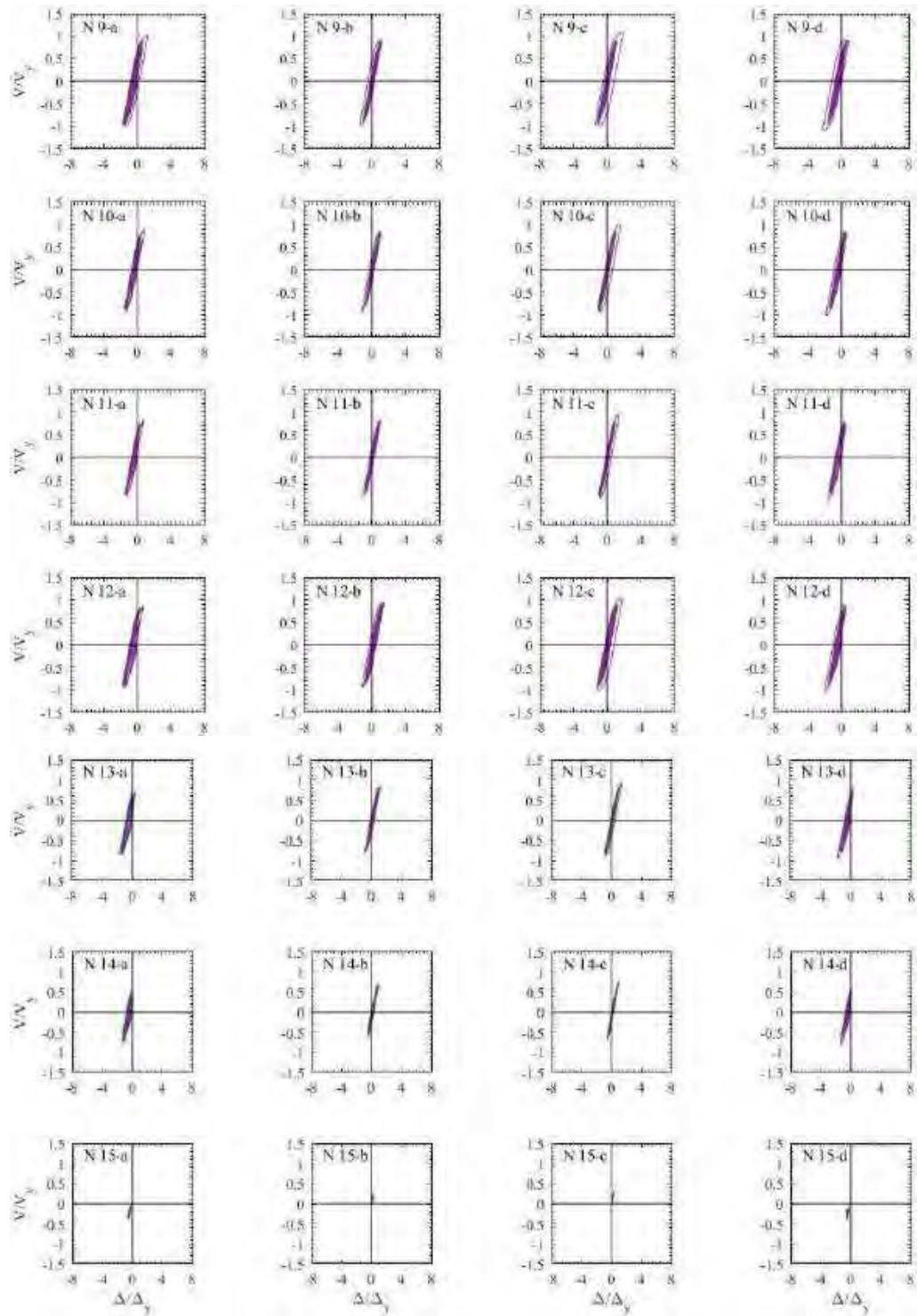
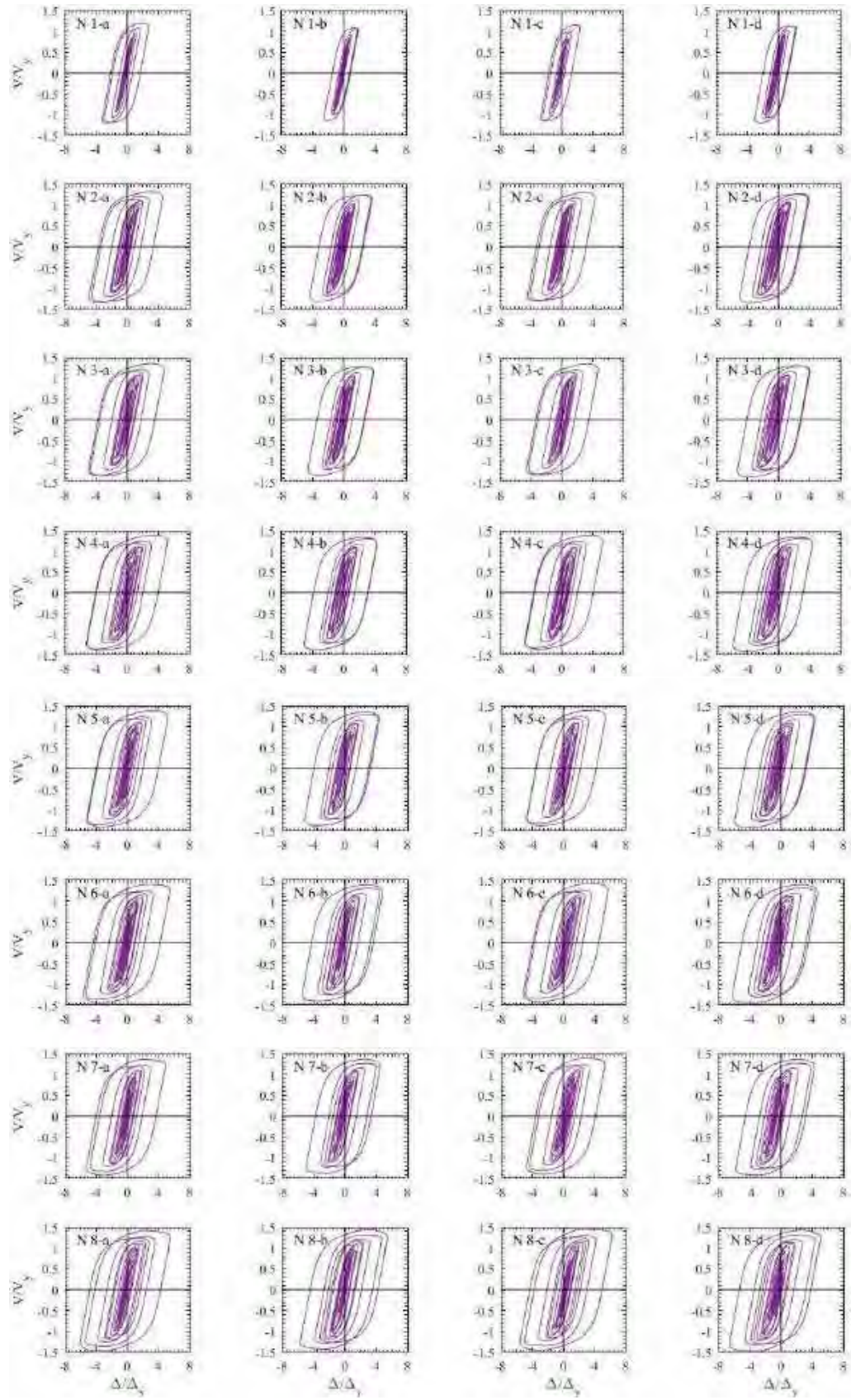


Figura G.157. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DX37-A (2017)



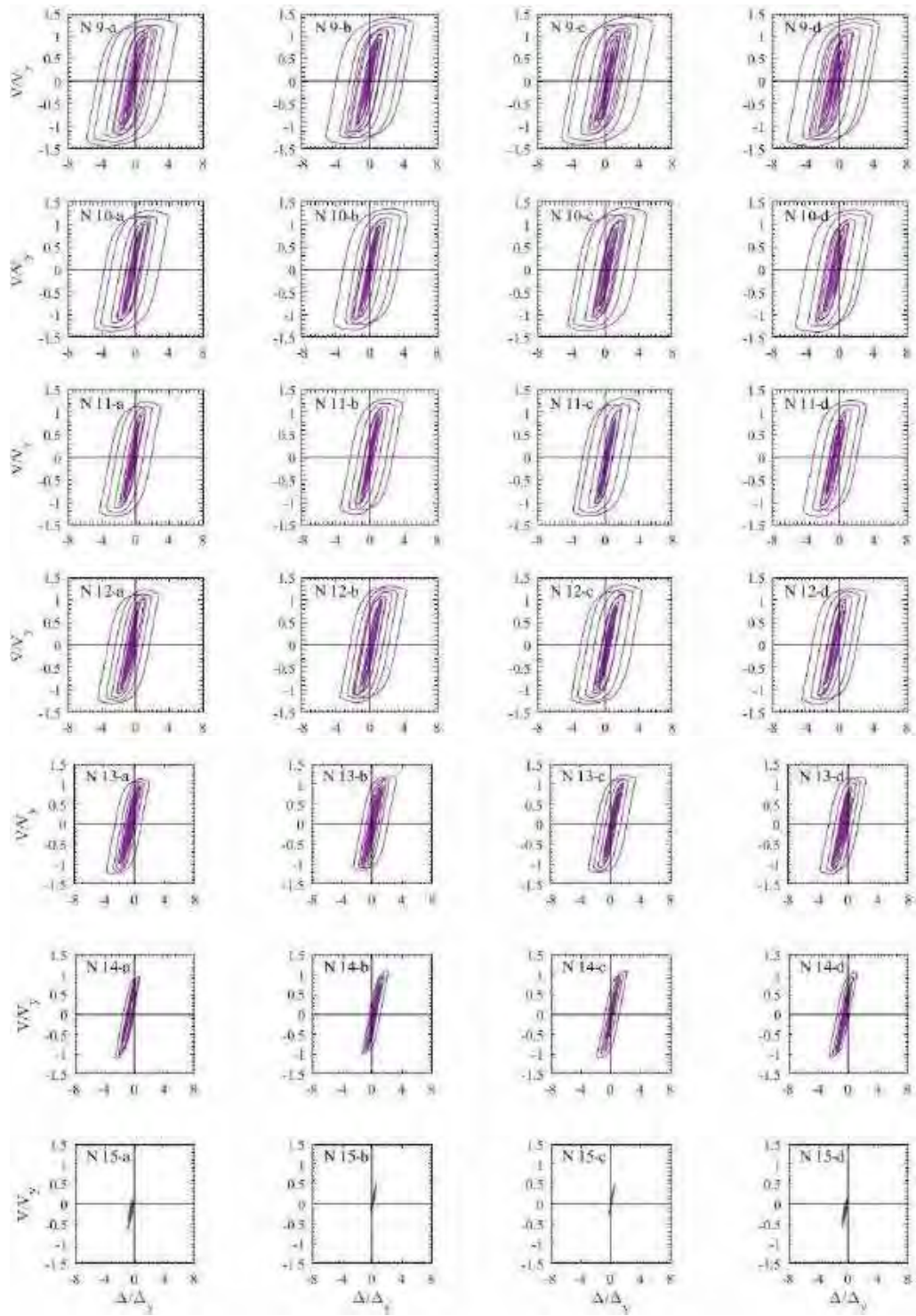
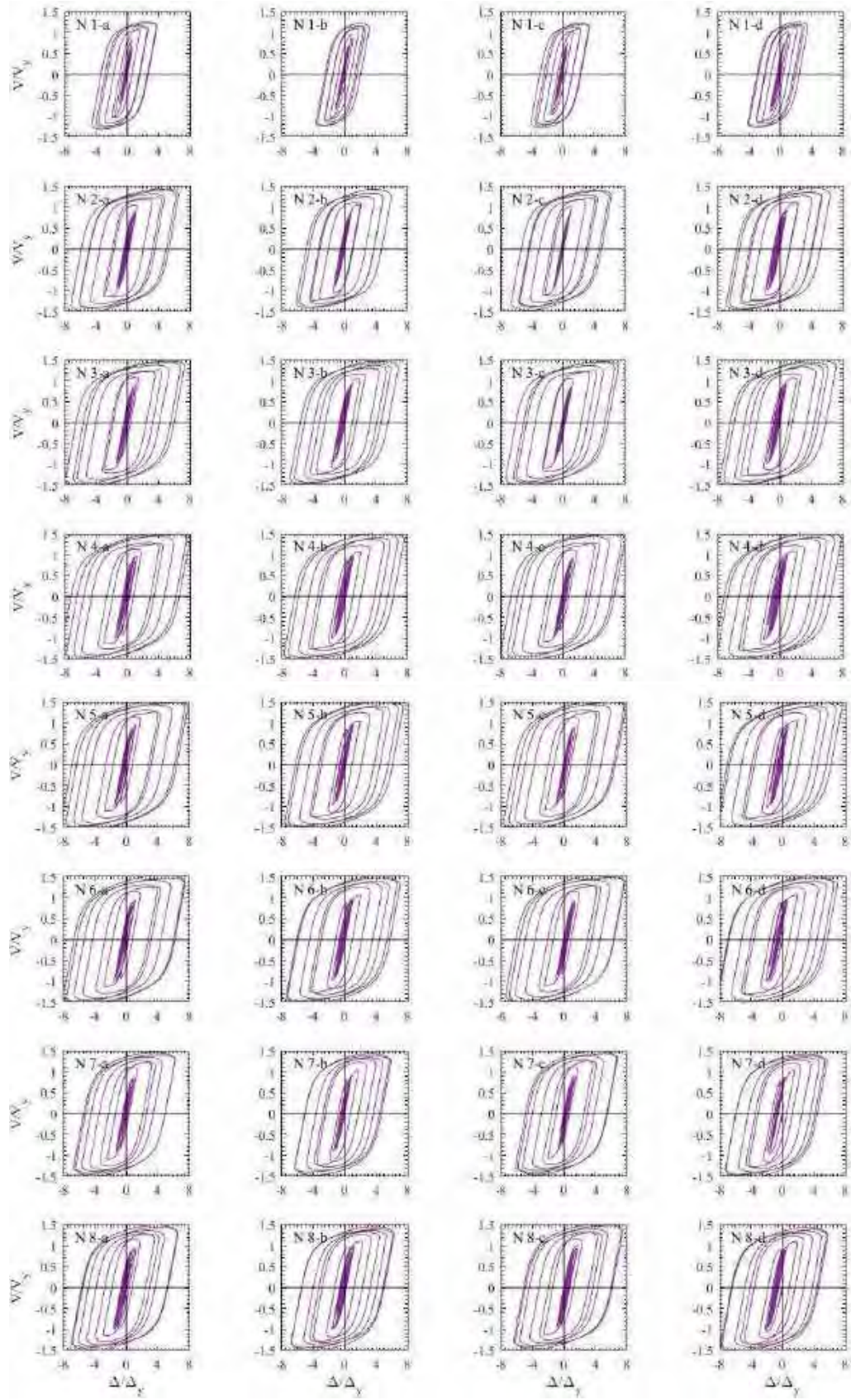


Figura G.158. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración DX37-B (2017)



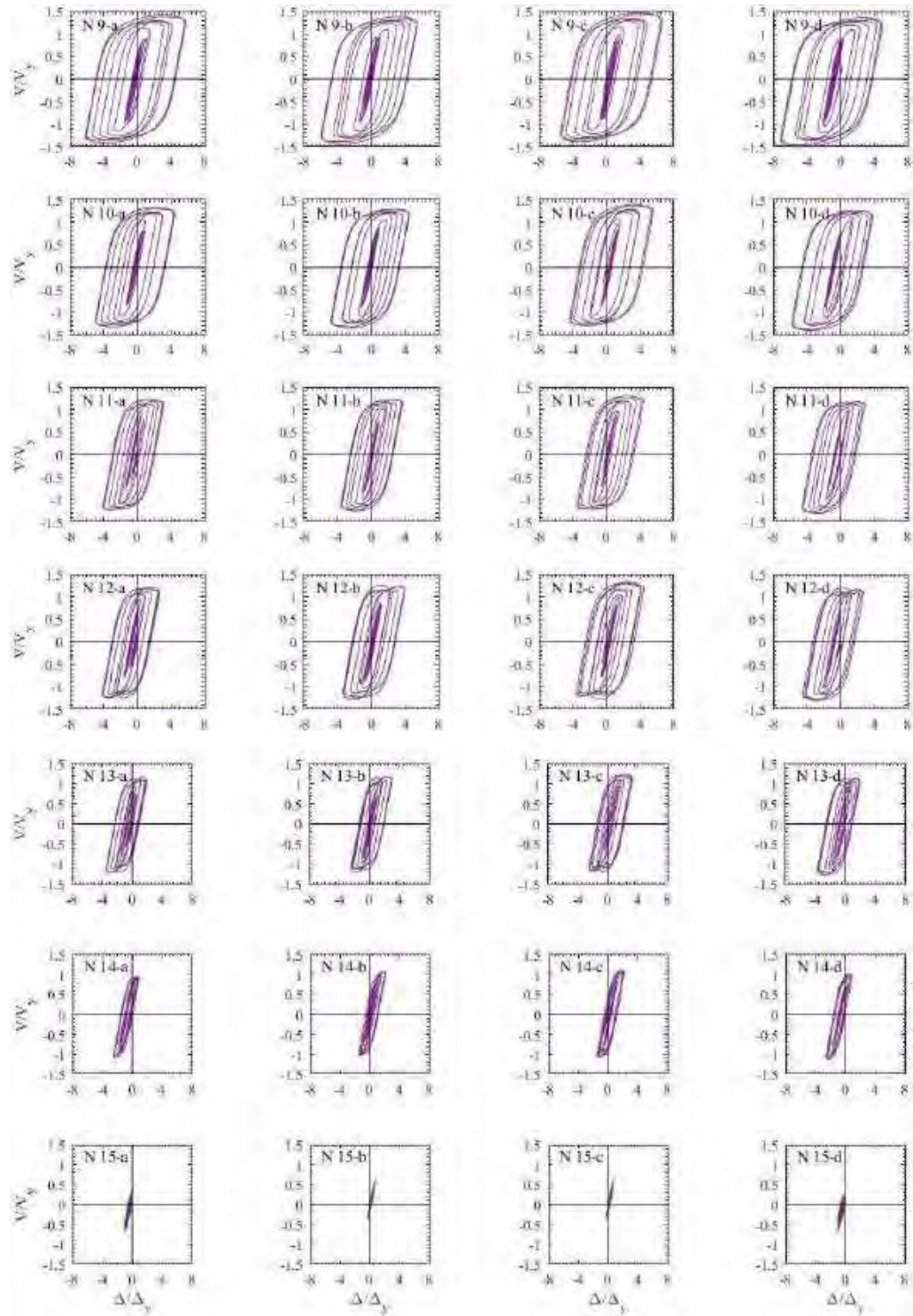
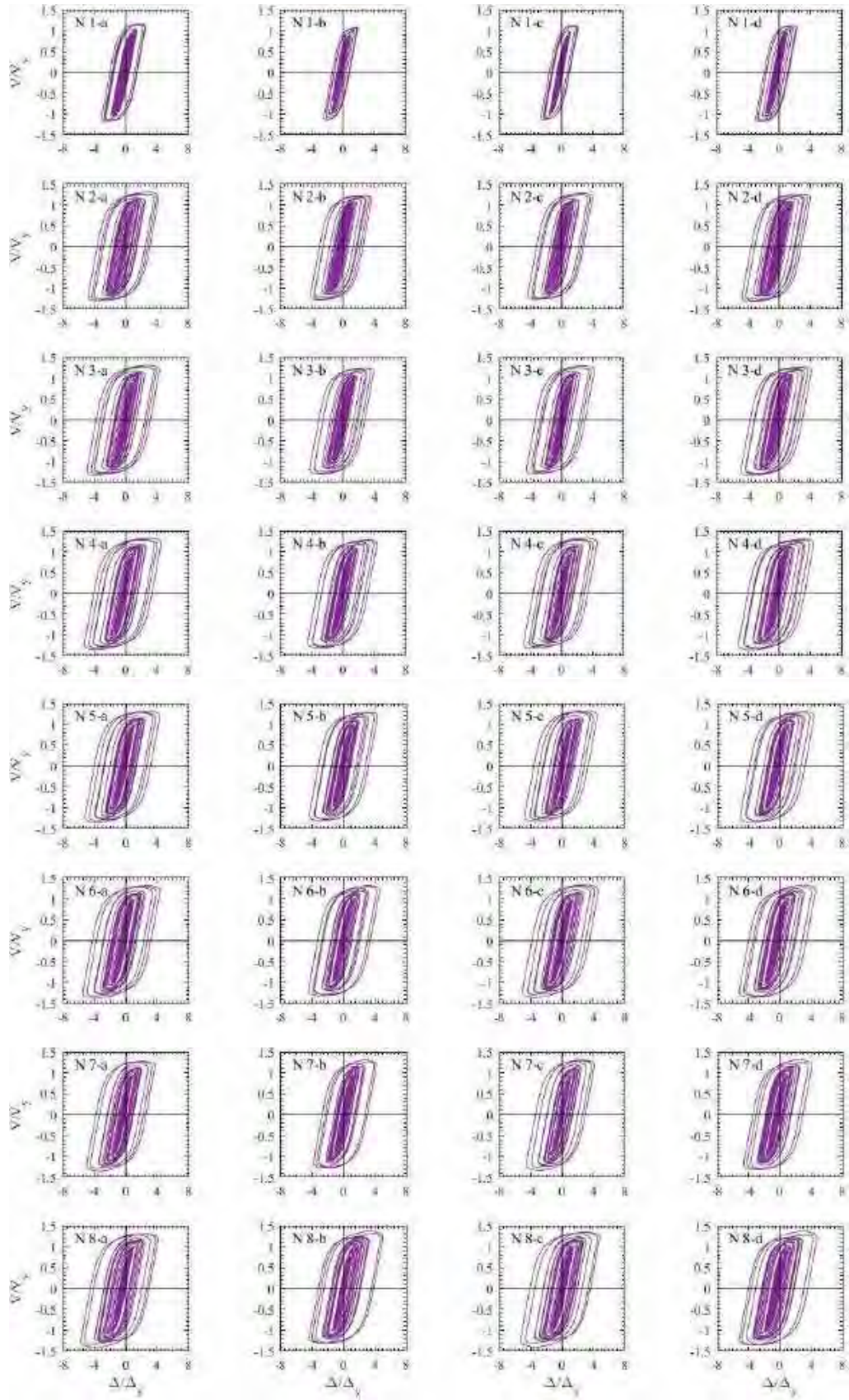


Figura G.159. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración JC54-A (2017)



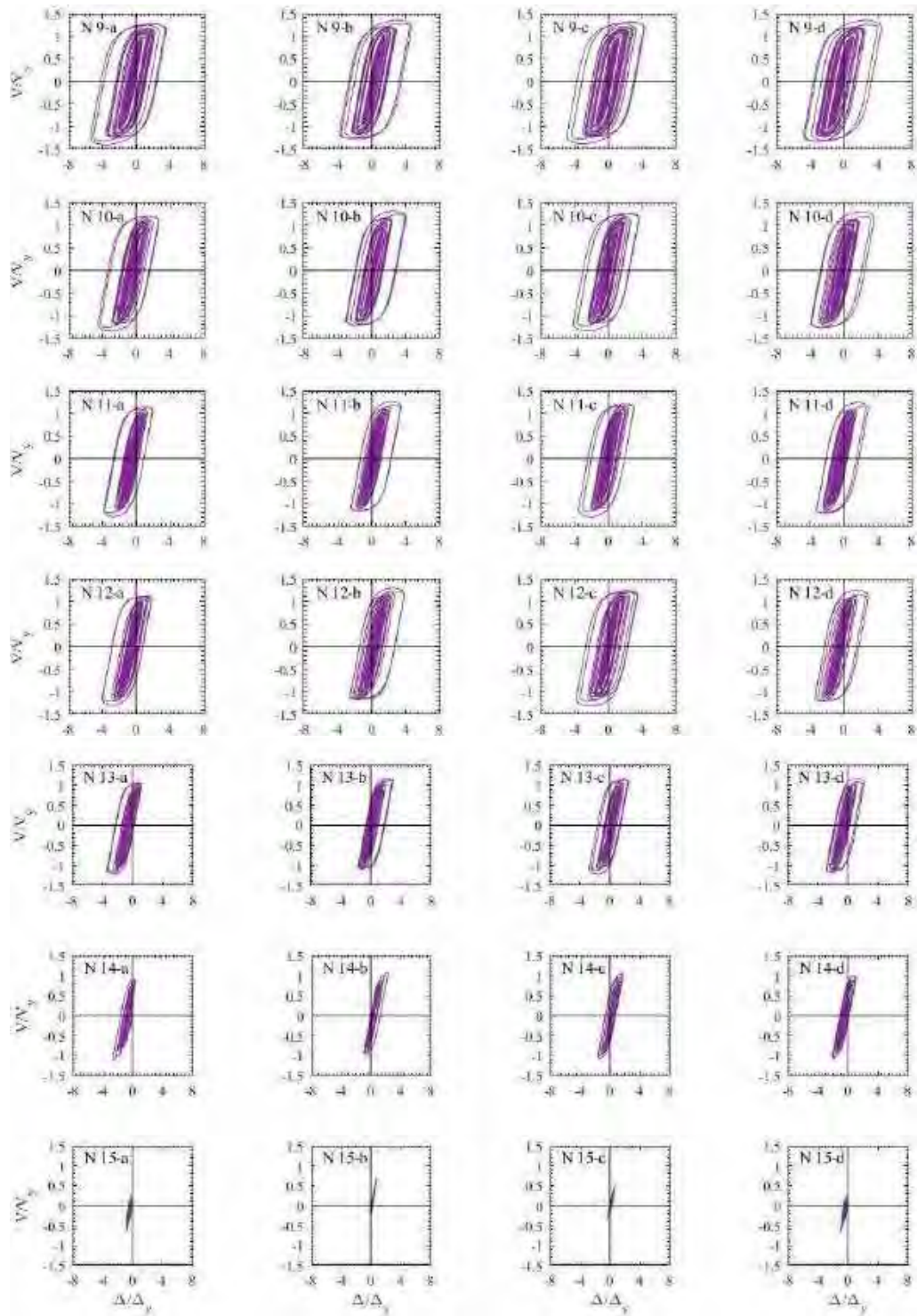


Figura G.160. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.2.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x

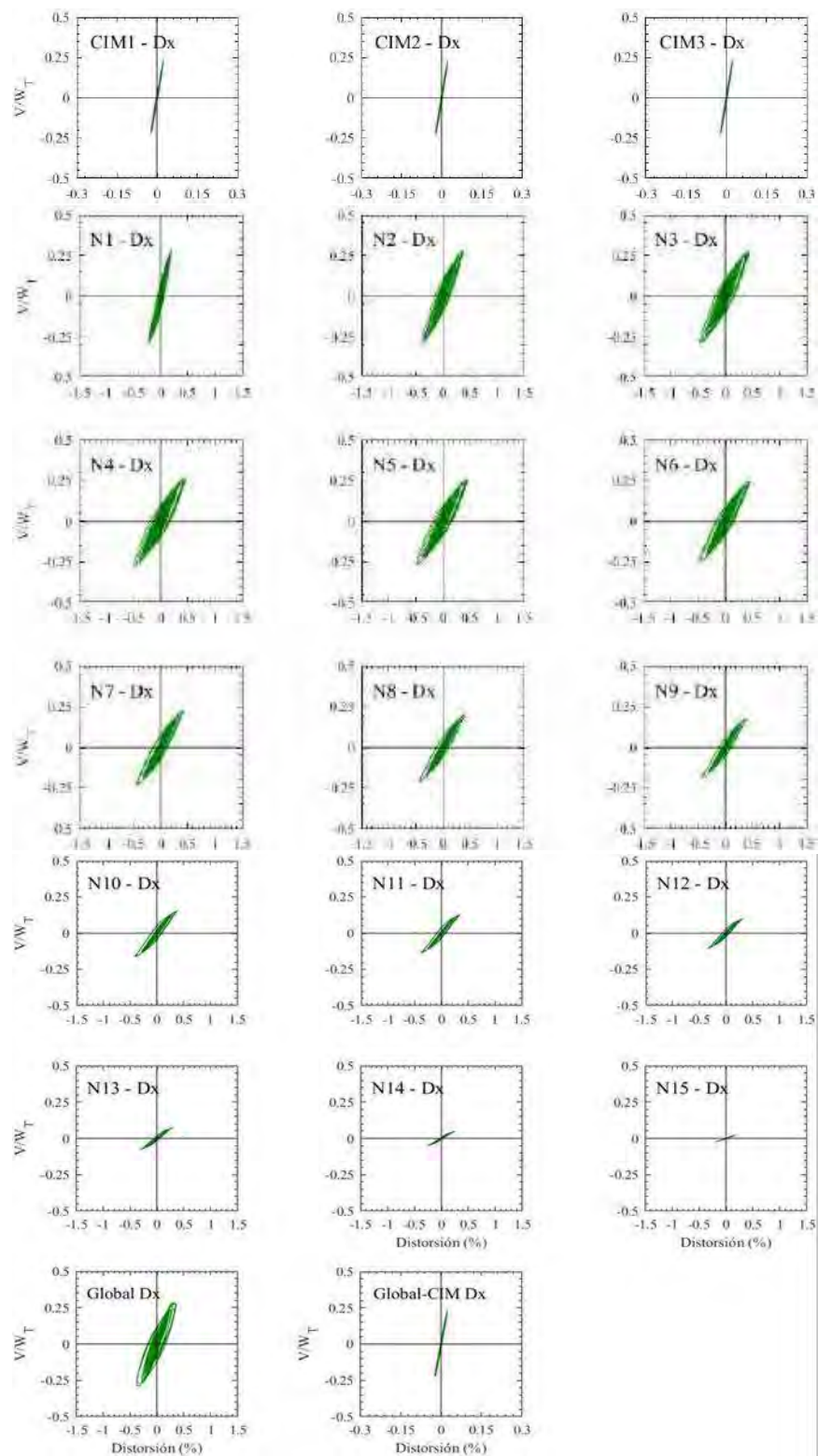


Figura G.161. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración CM-A

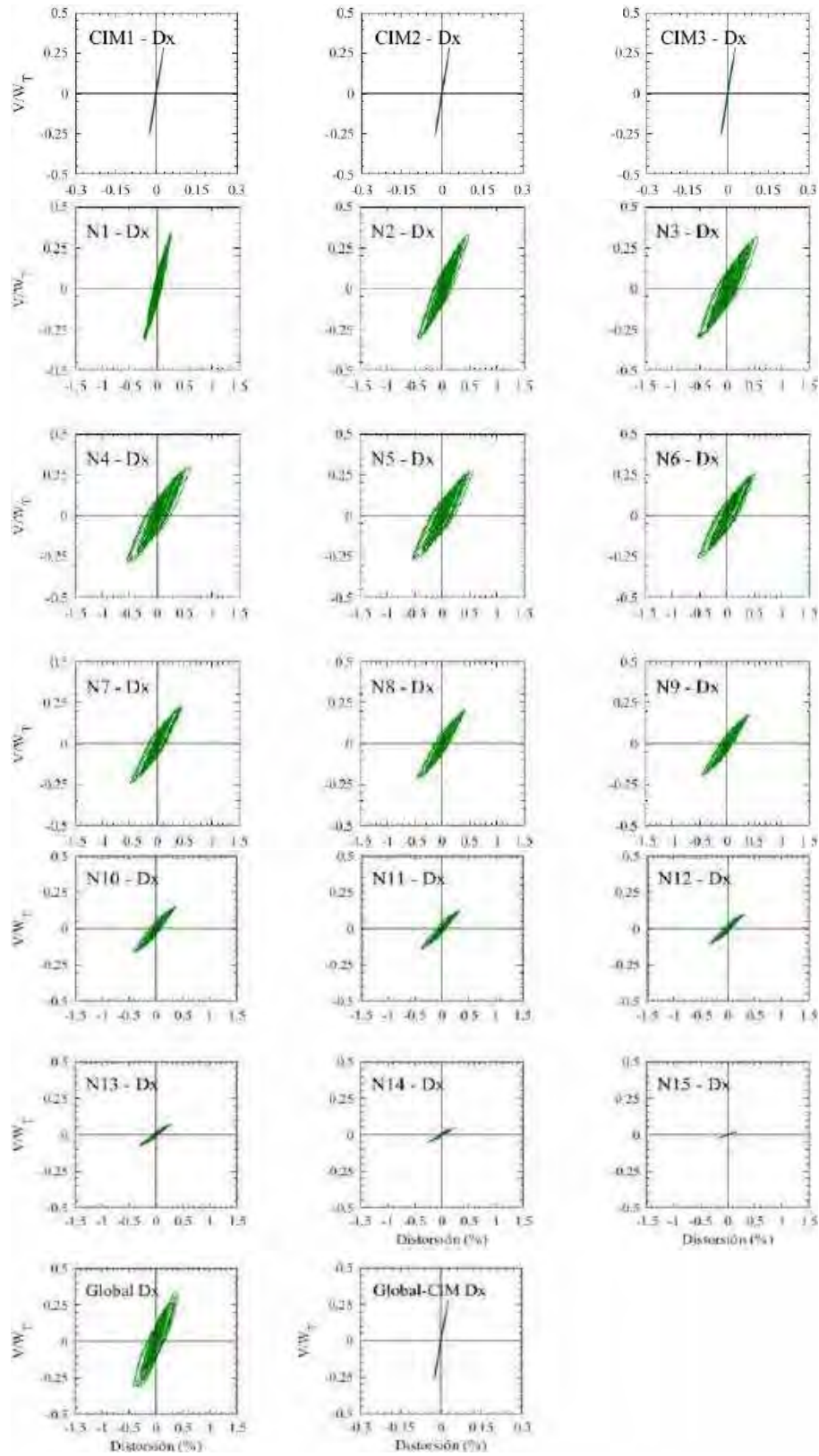


Figura G.162. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección x, registros de aceleración CM-B

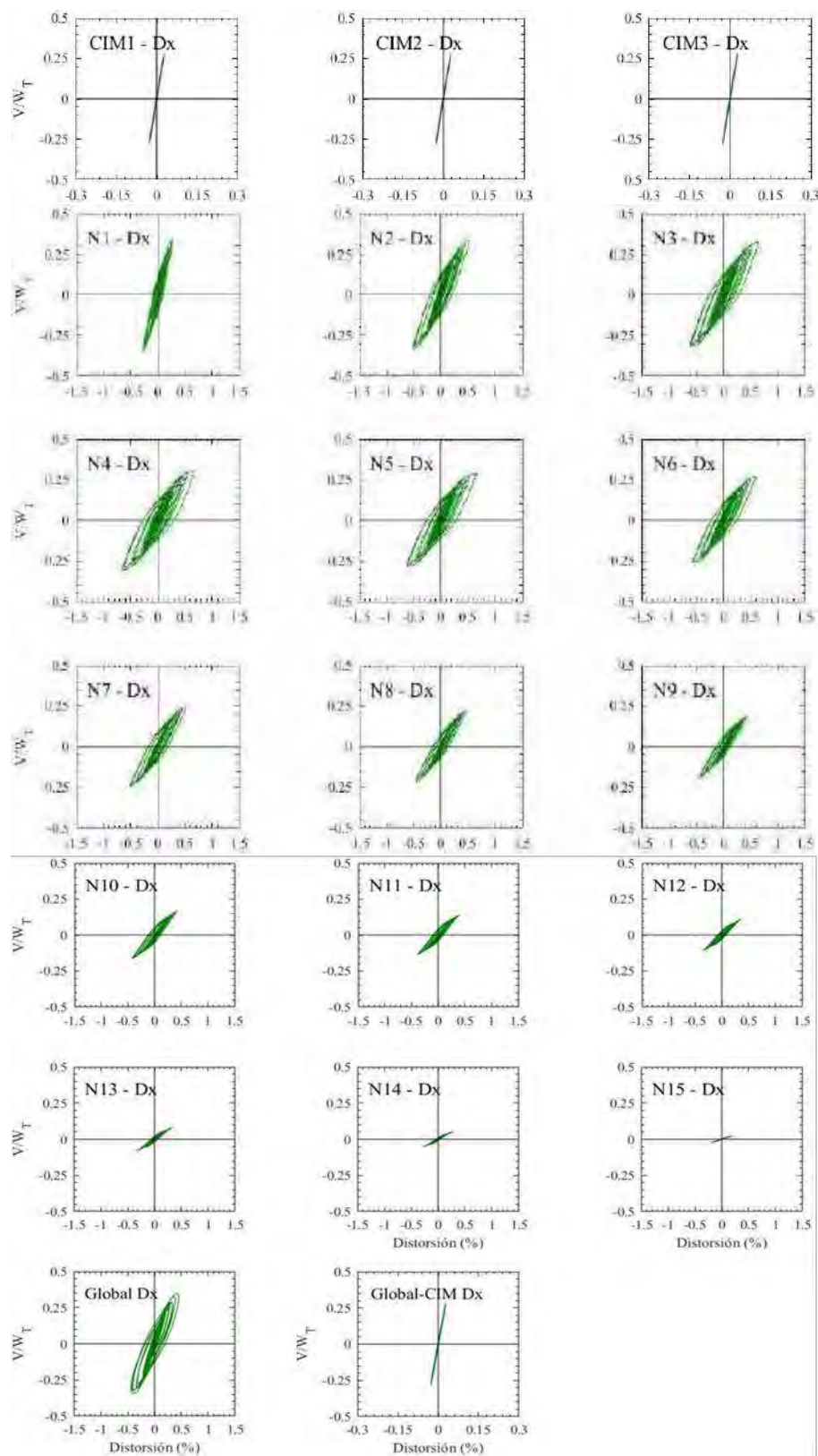


Figura G.163. Ciclos de histéresis de los entropisos en dirección x, registros de aceleración DFRO-A

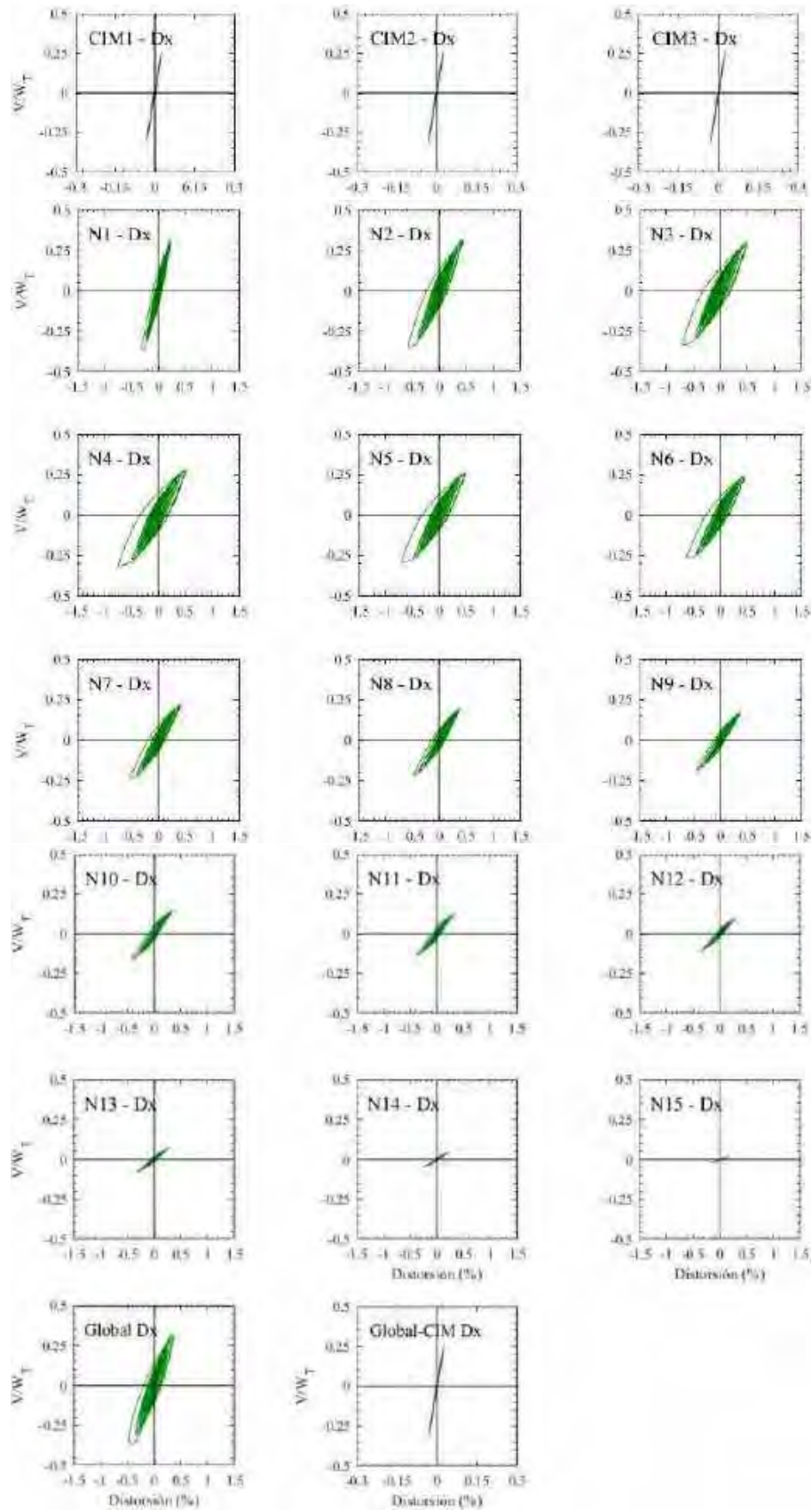


Figura G.164. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración DFRO –B

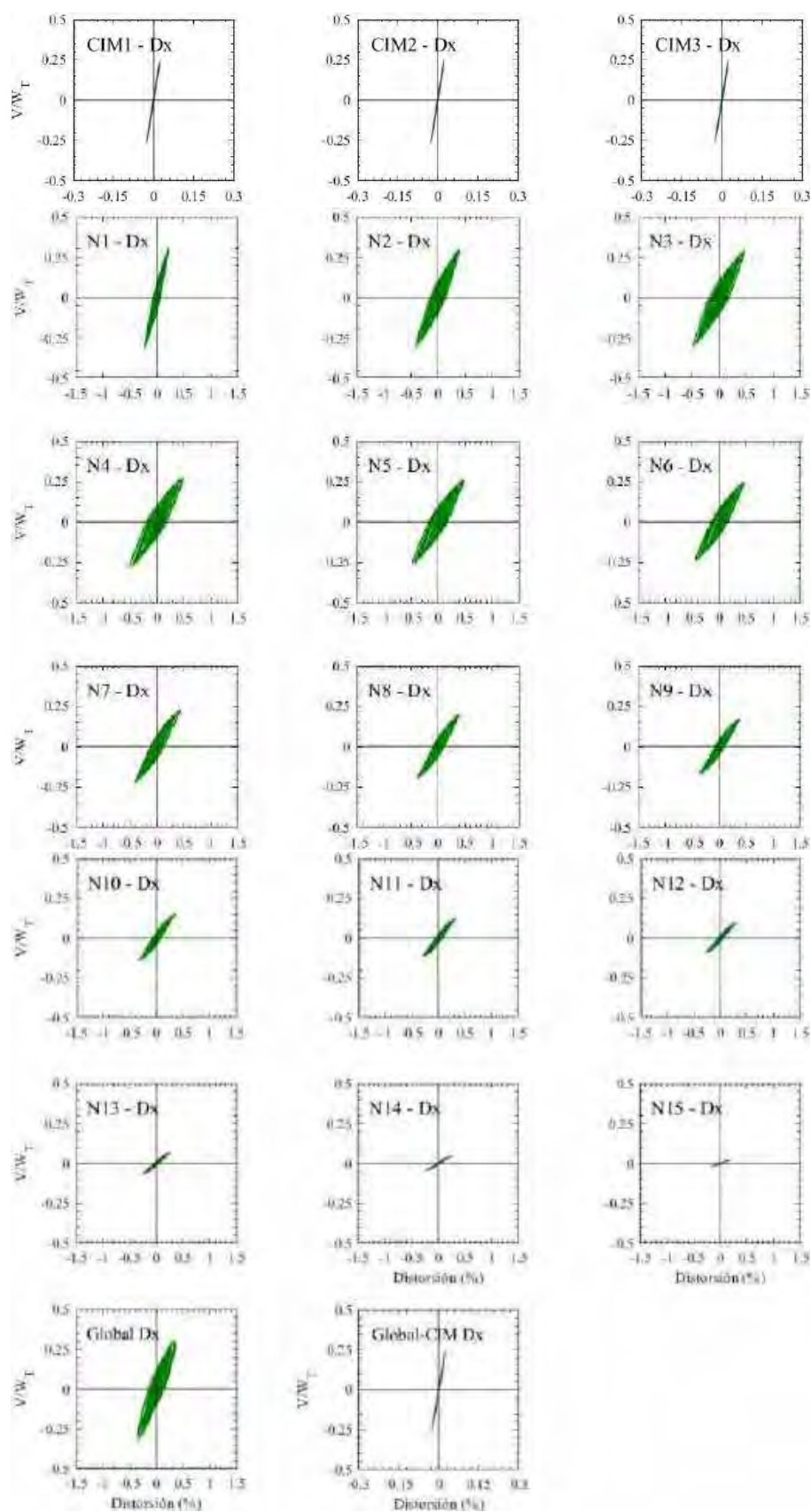


Figura G.165. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración IMSR-A

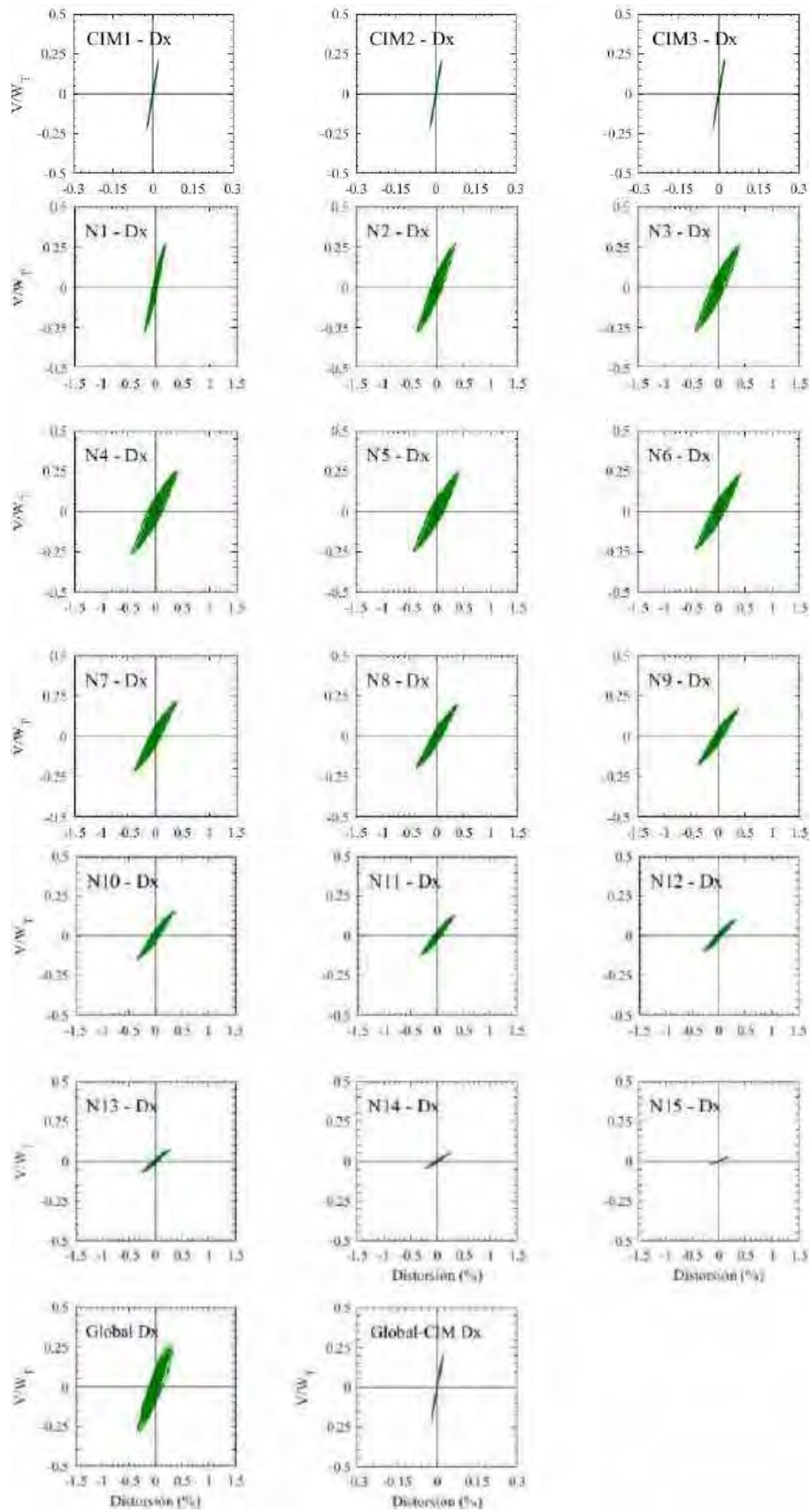


Figura G.166. Ciclos de histéresis de los entrapisos en dirección x, registros de aceleración IMSR –B

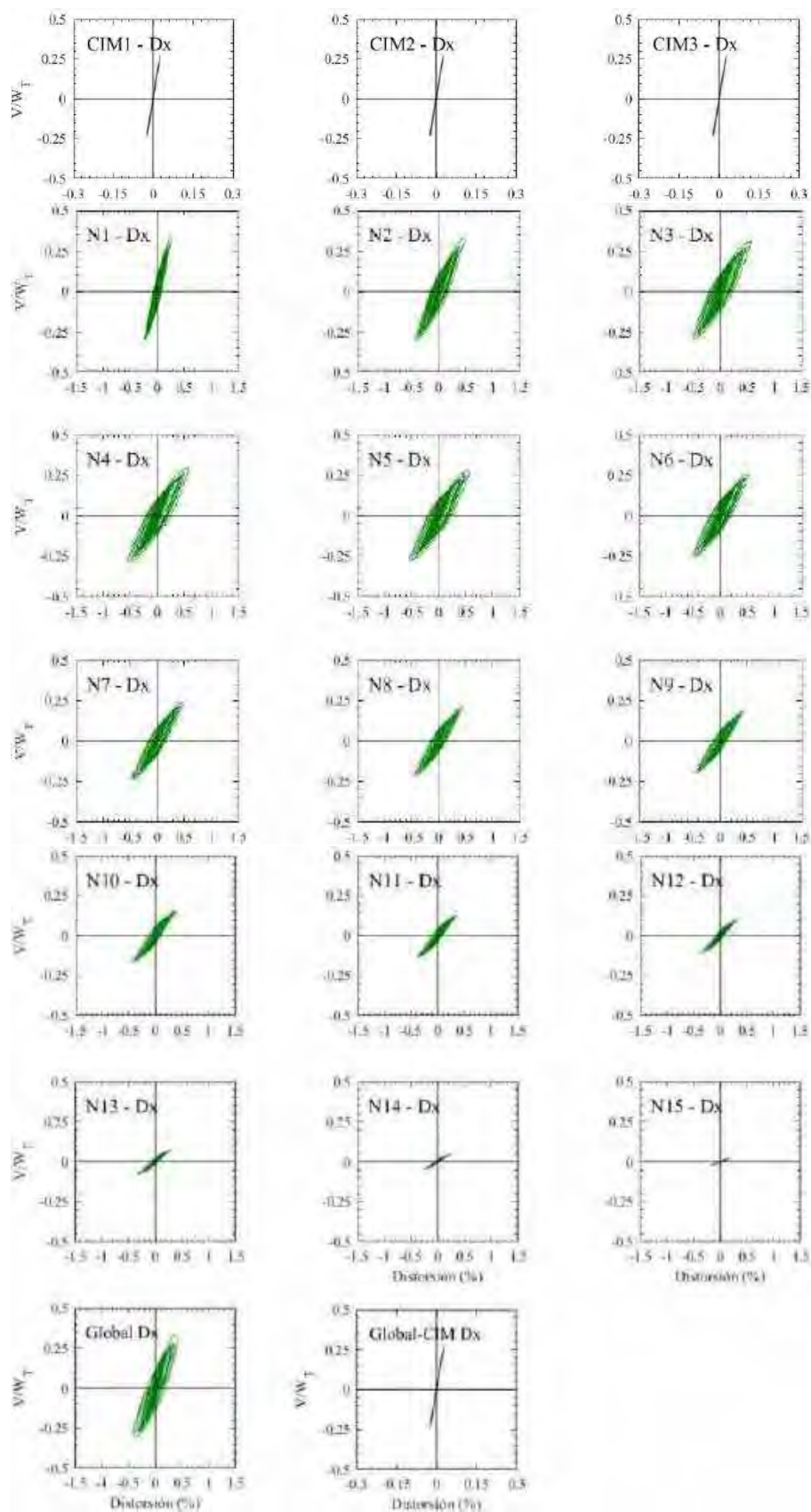


Figura G.167. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración SMR-A

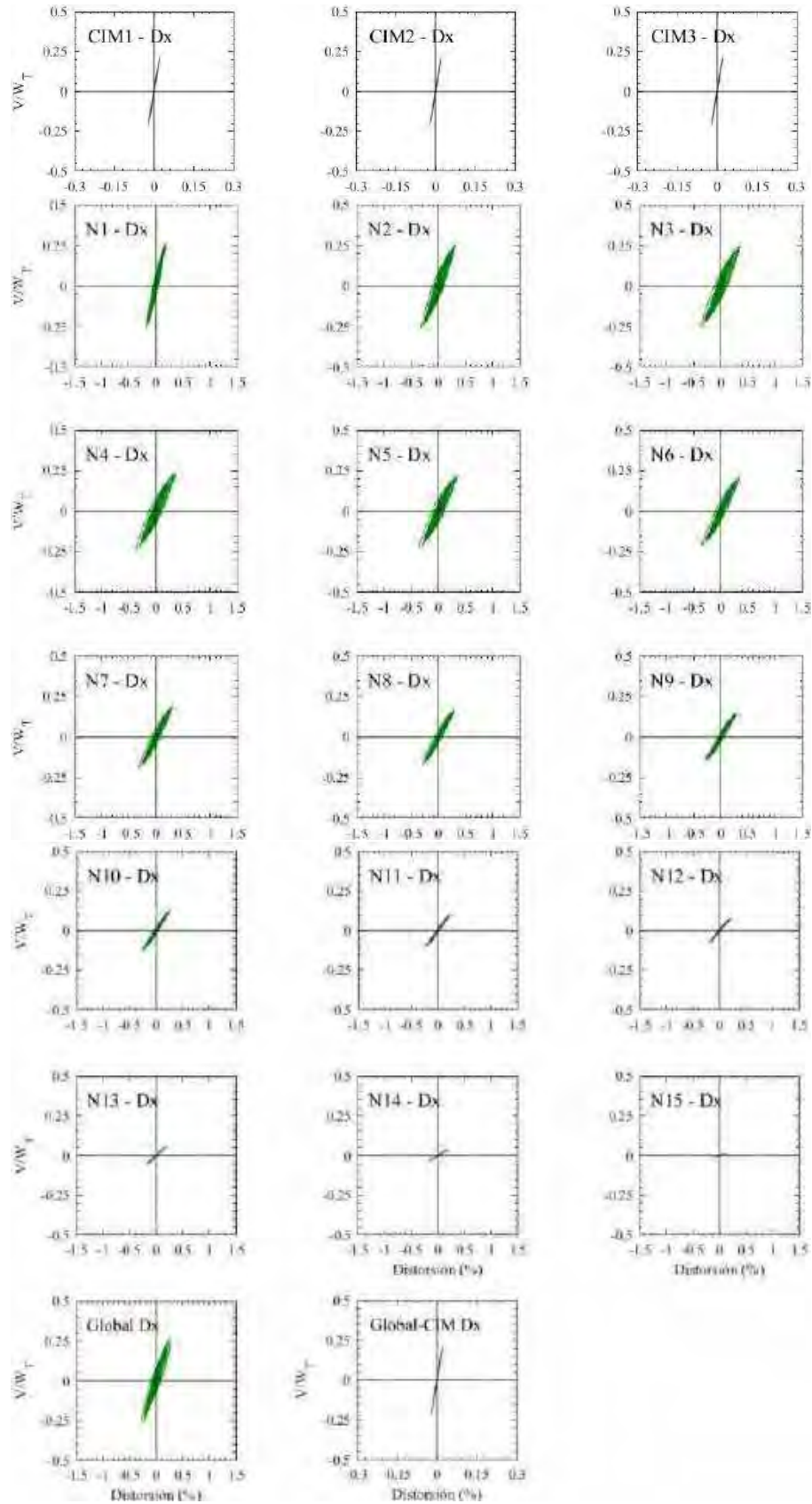


Figura G.168. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración SMR-B

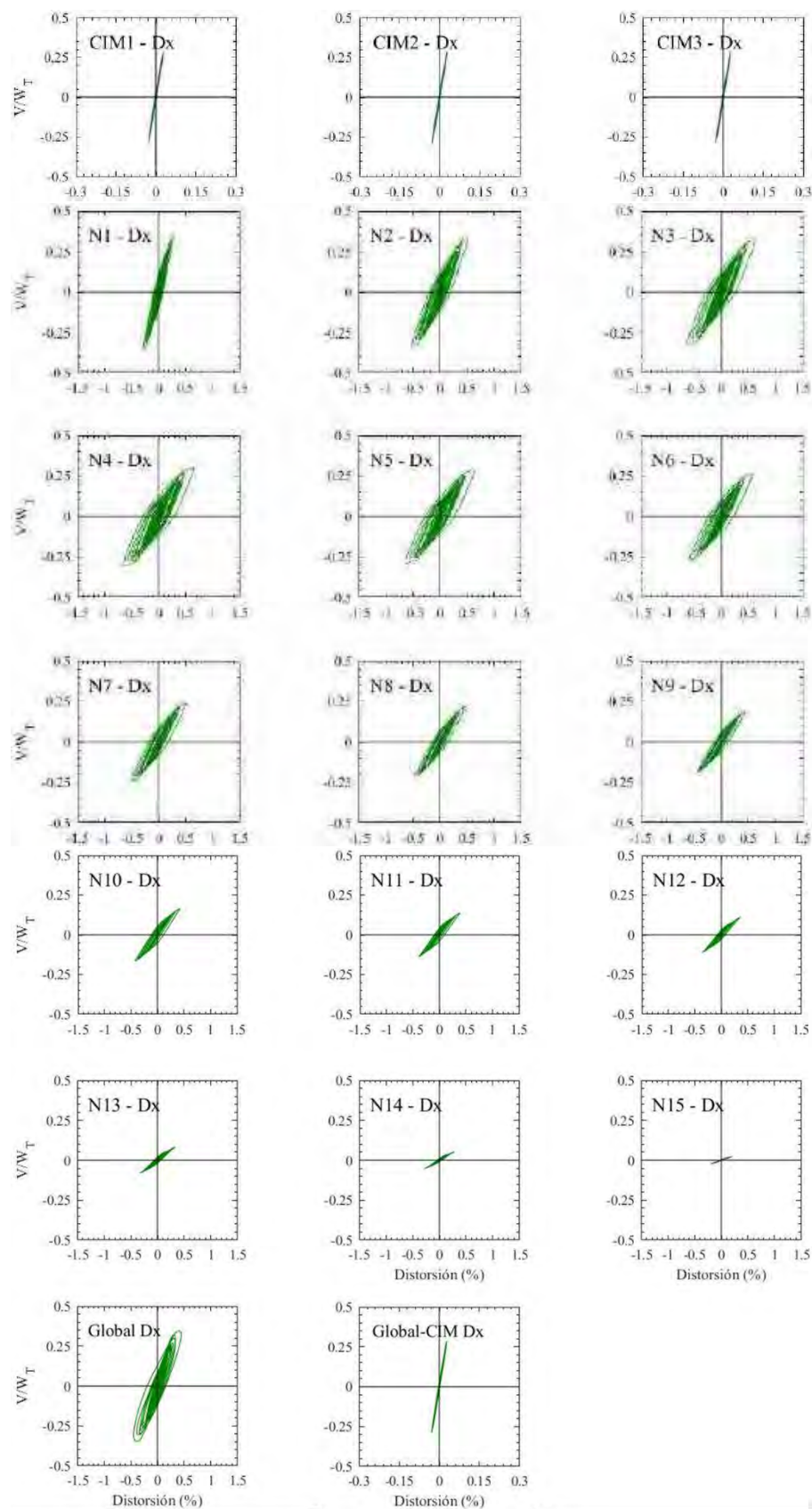


Figura G.169. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración MI15-A

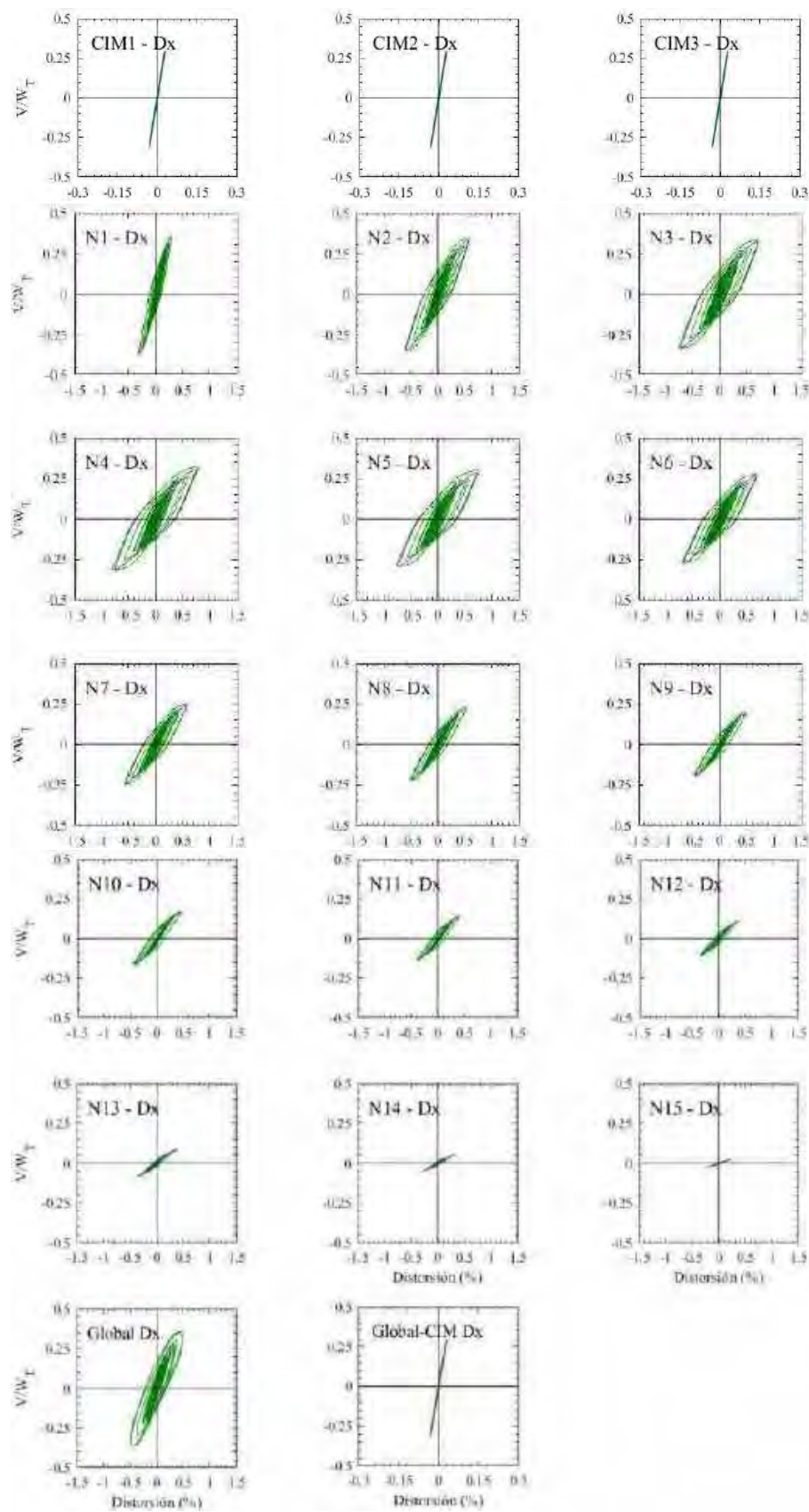


Figura G.170. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración MI15-B

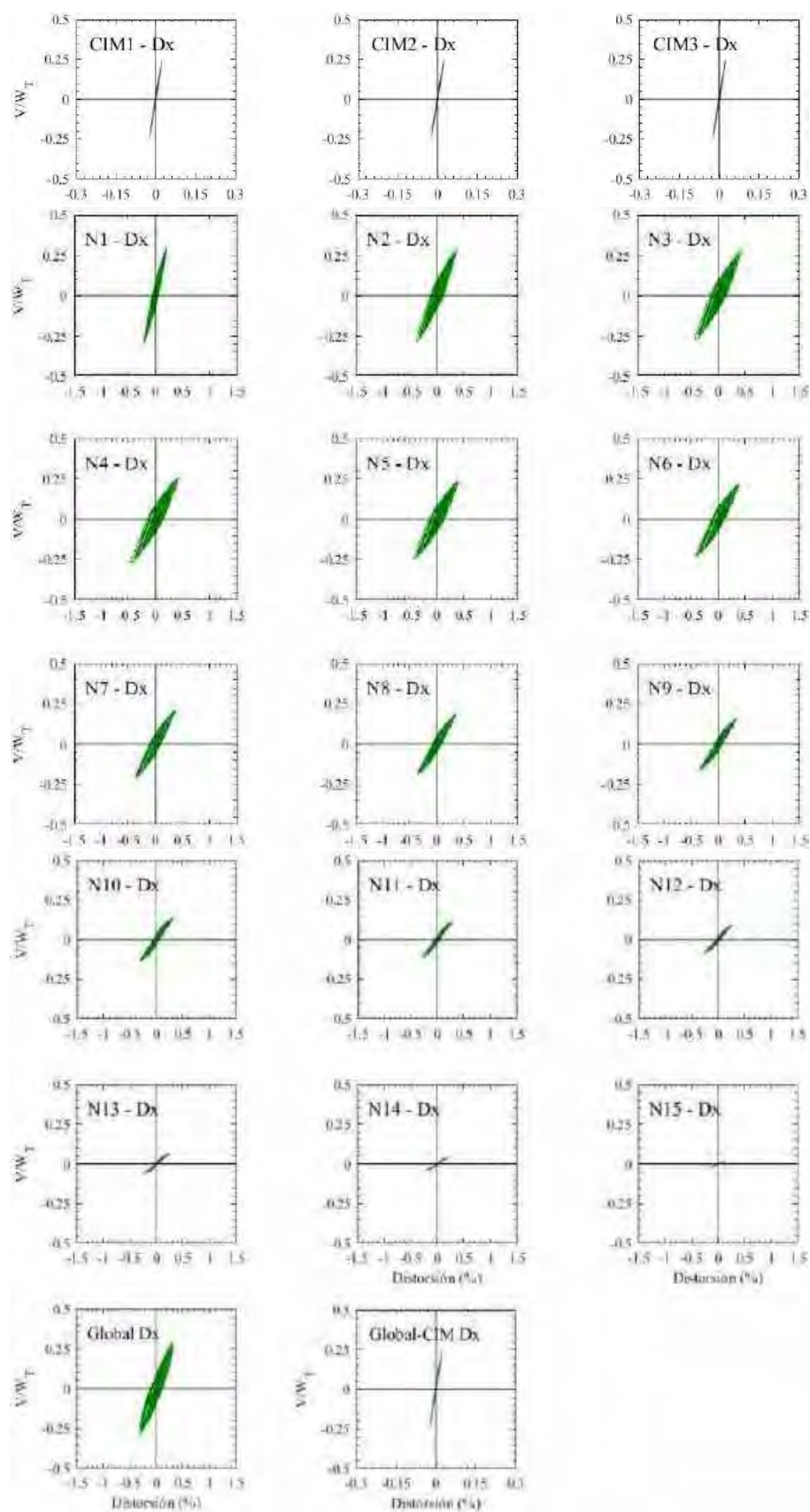


Figura G.171. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración CU80-A (2017)

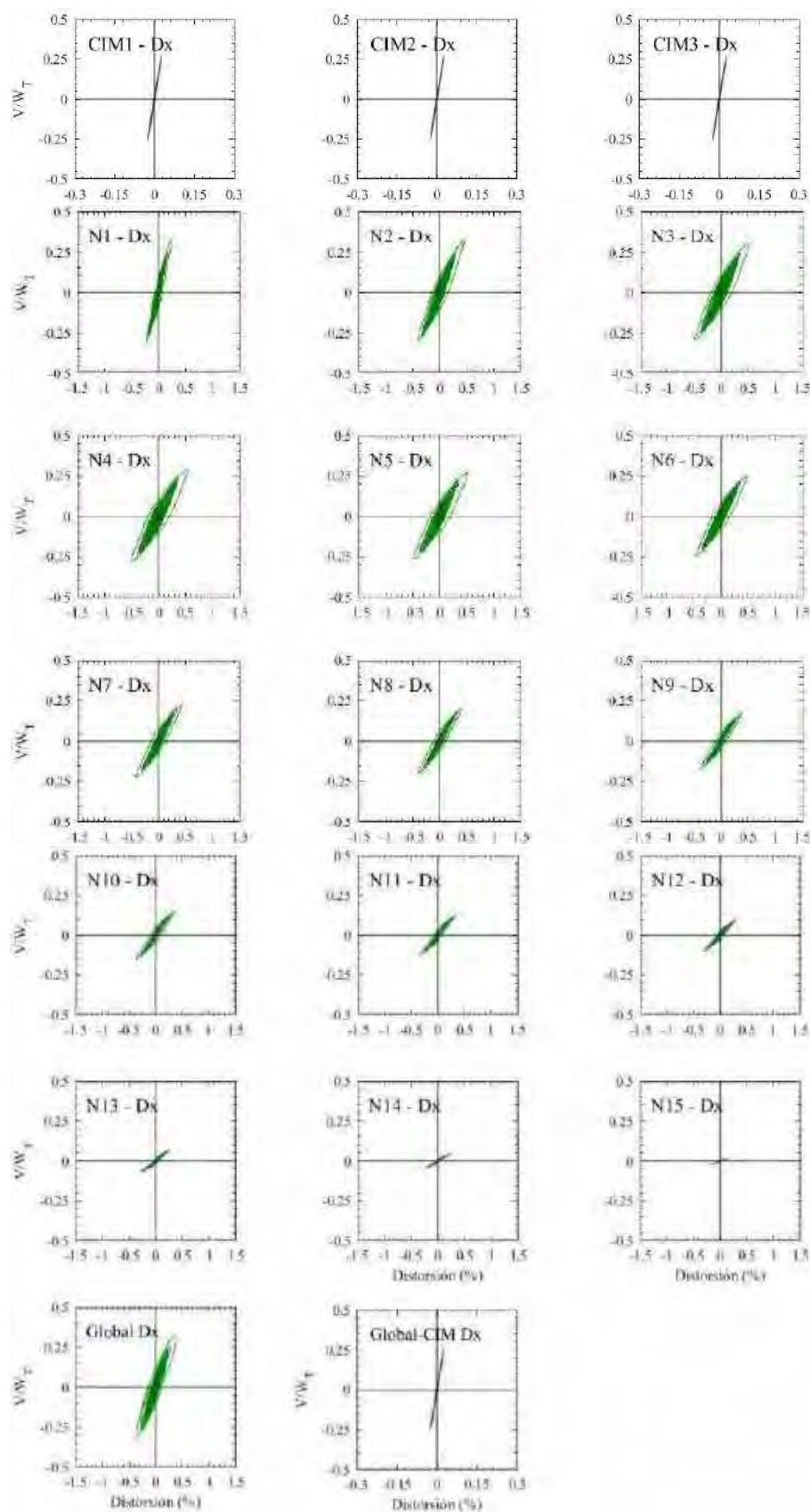


Figura G.172. Ciclos de histéresis de los entepisos en dirección x, registros de aceleración CU80-B (2017)

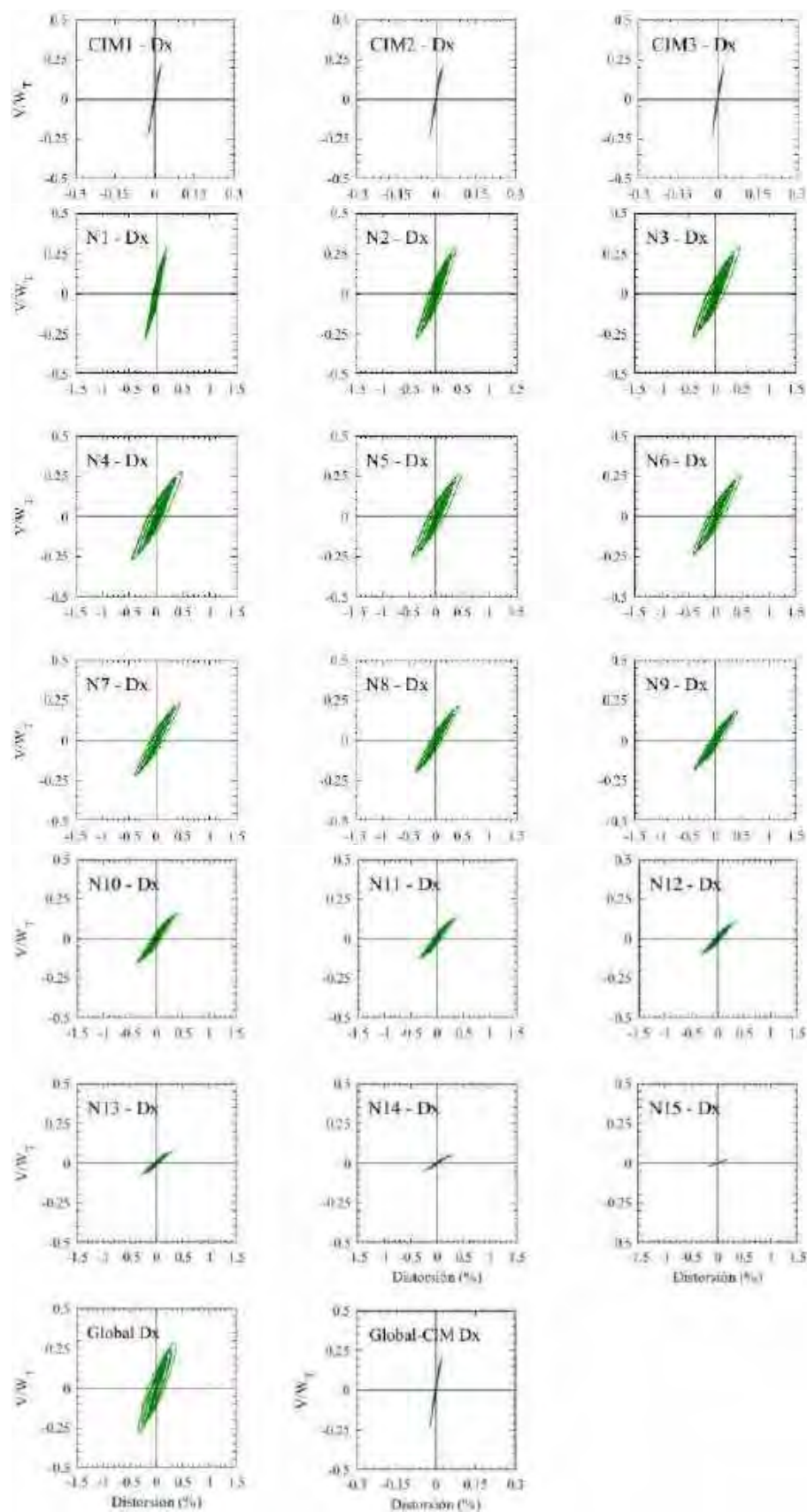


Figura G.173. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración DX37-A (2017)

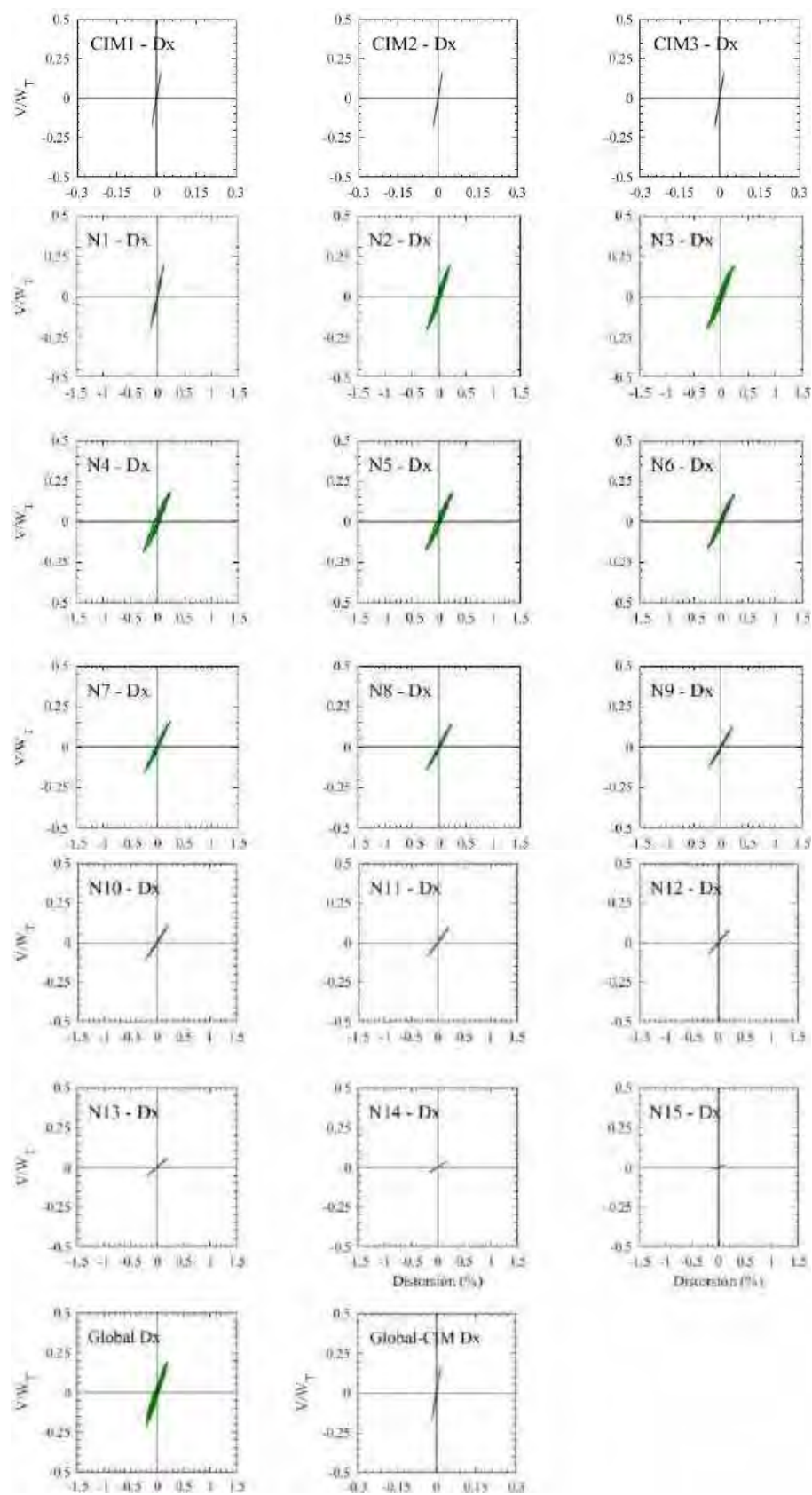


Figura G.174. Ciclos de histéresis de los entropisos en dirección x, registros de aceleración DX37-B (2017)

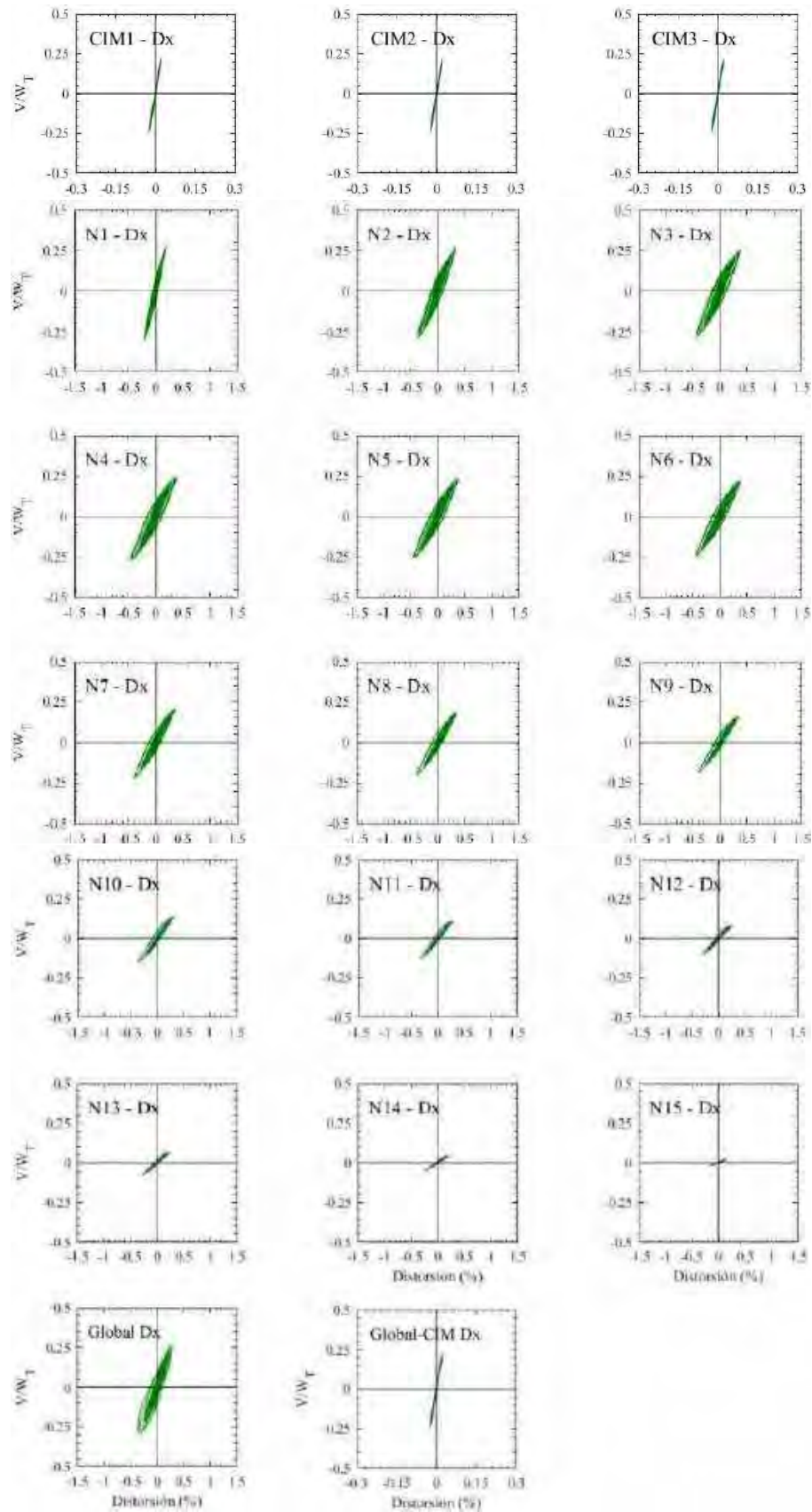


Figura G.175. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración JC54-A (2017)

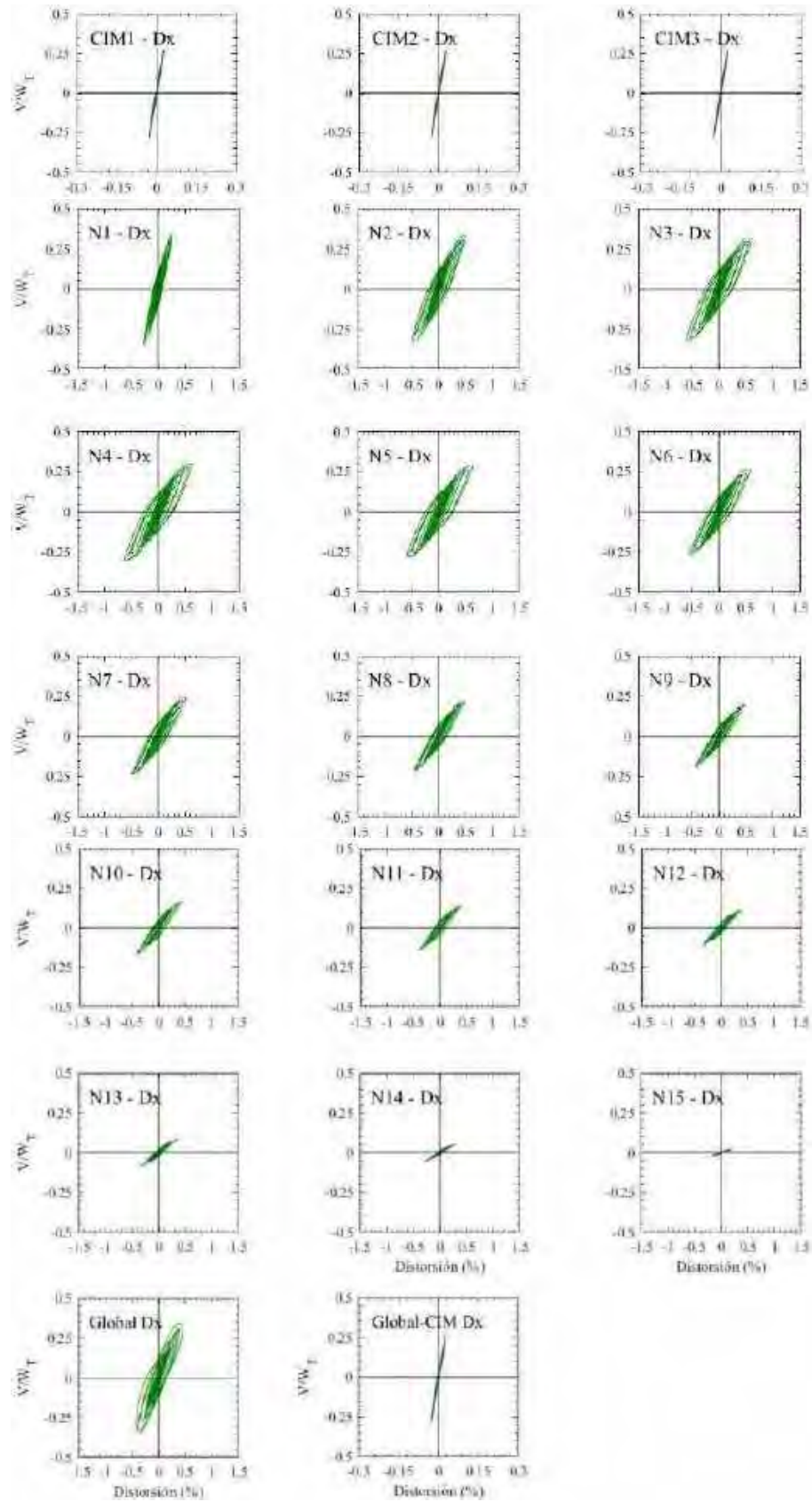


Figura G.176. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración JC54-B (2017)

G.2.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y

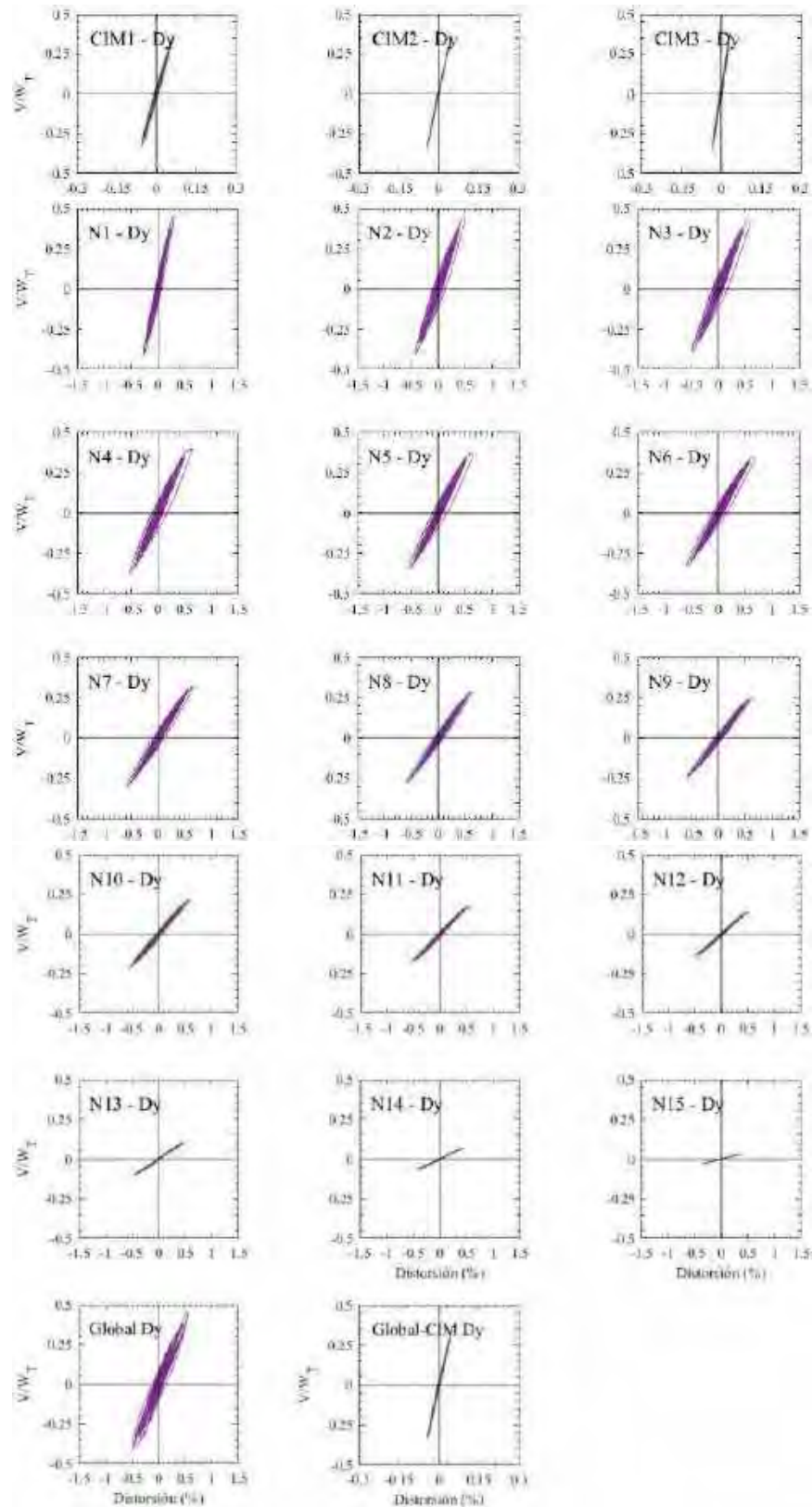


Figura G.177. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CM-A

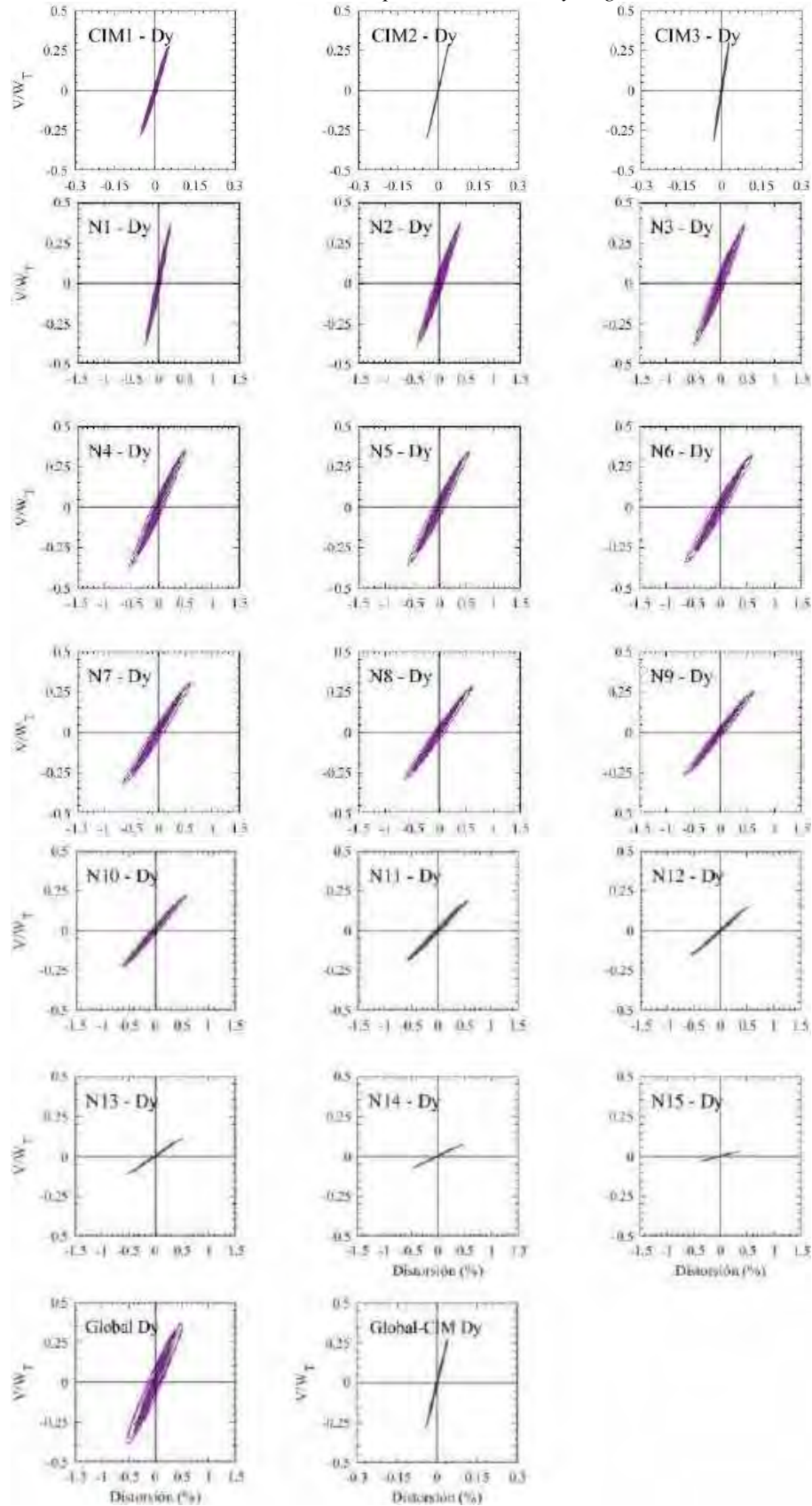


Figura G.178. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CM-B

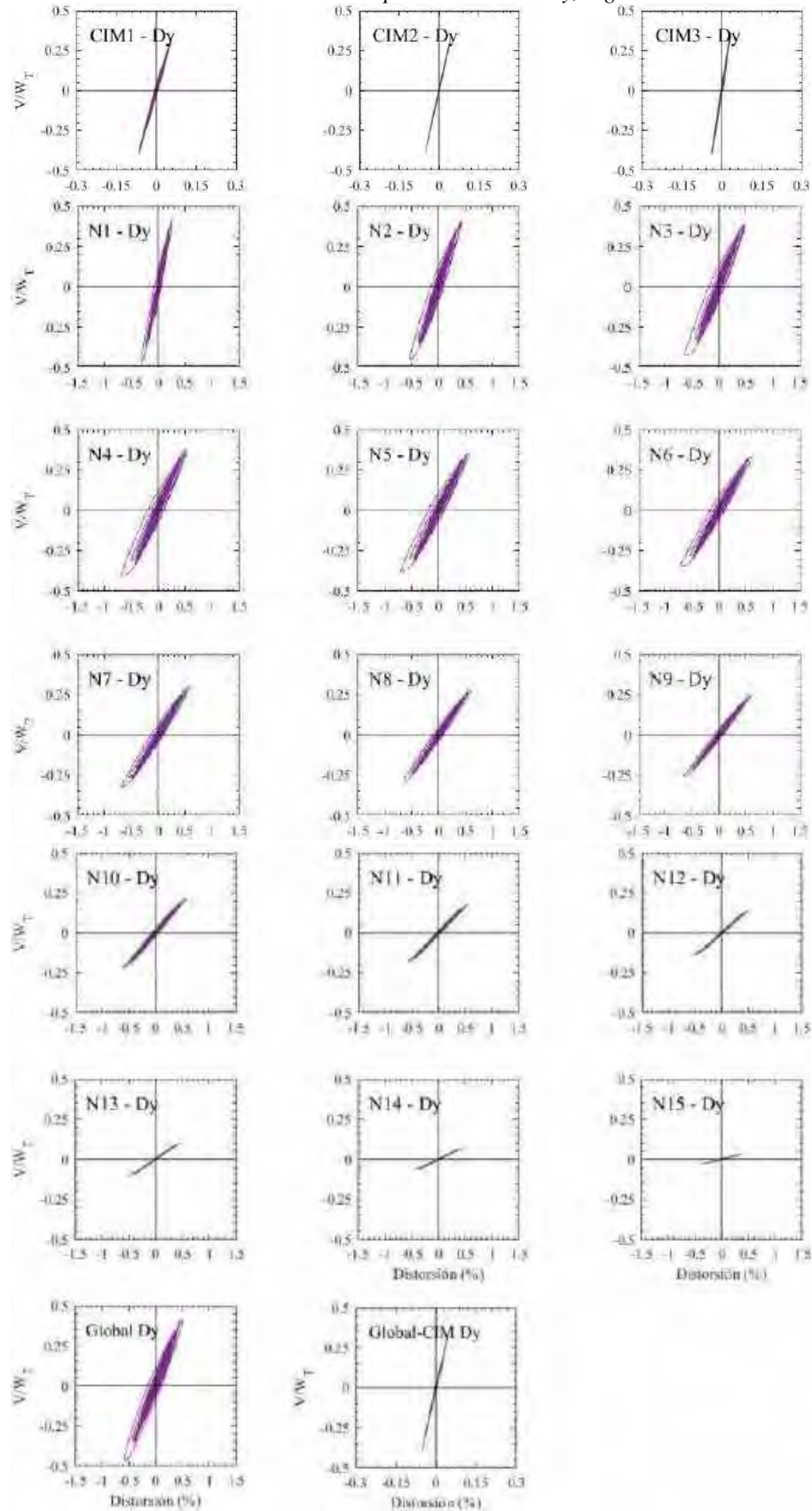


Figura G.179. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración DFRO-A

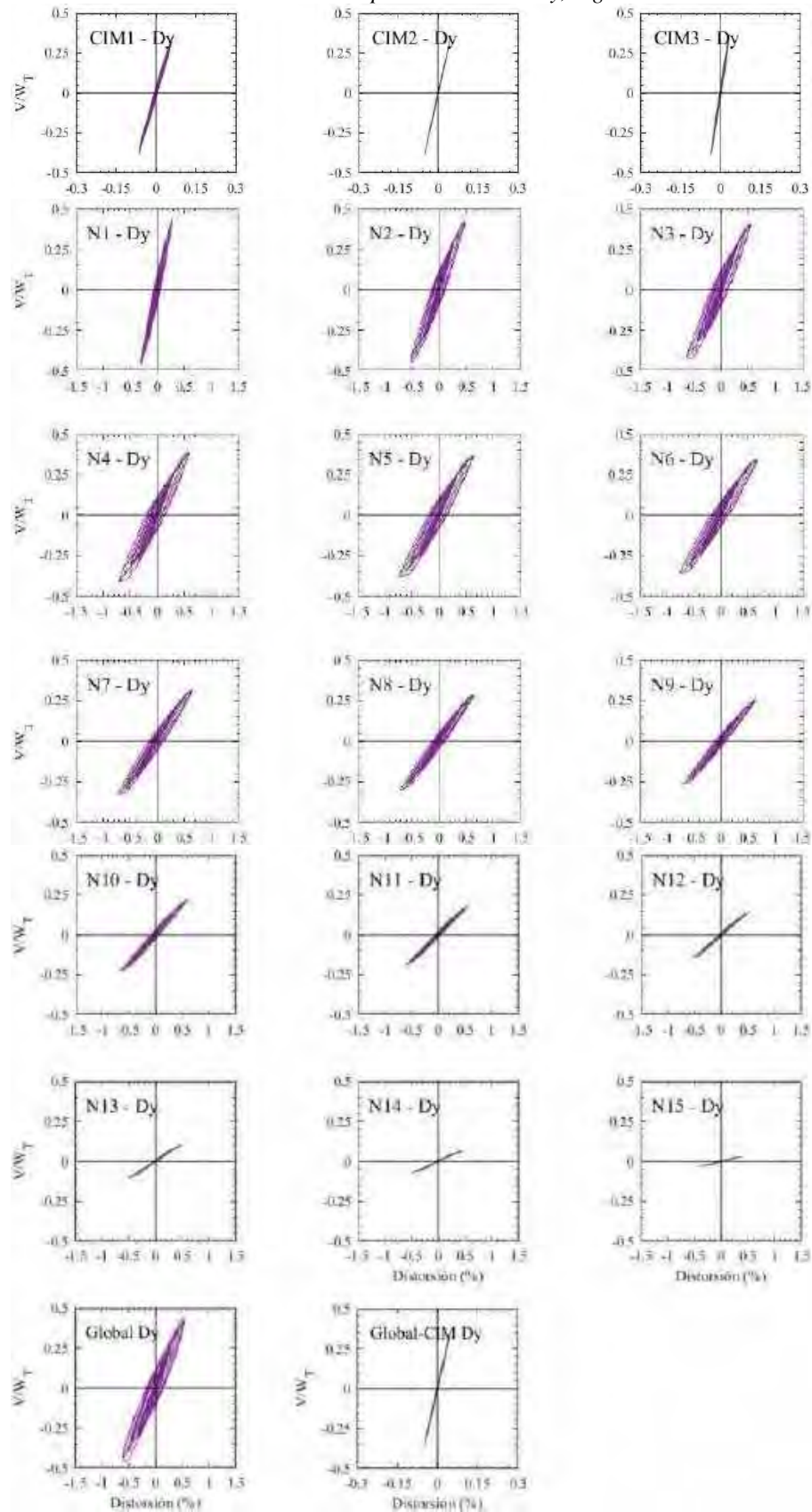


Figura G.180. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración DFRO –B

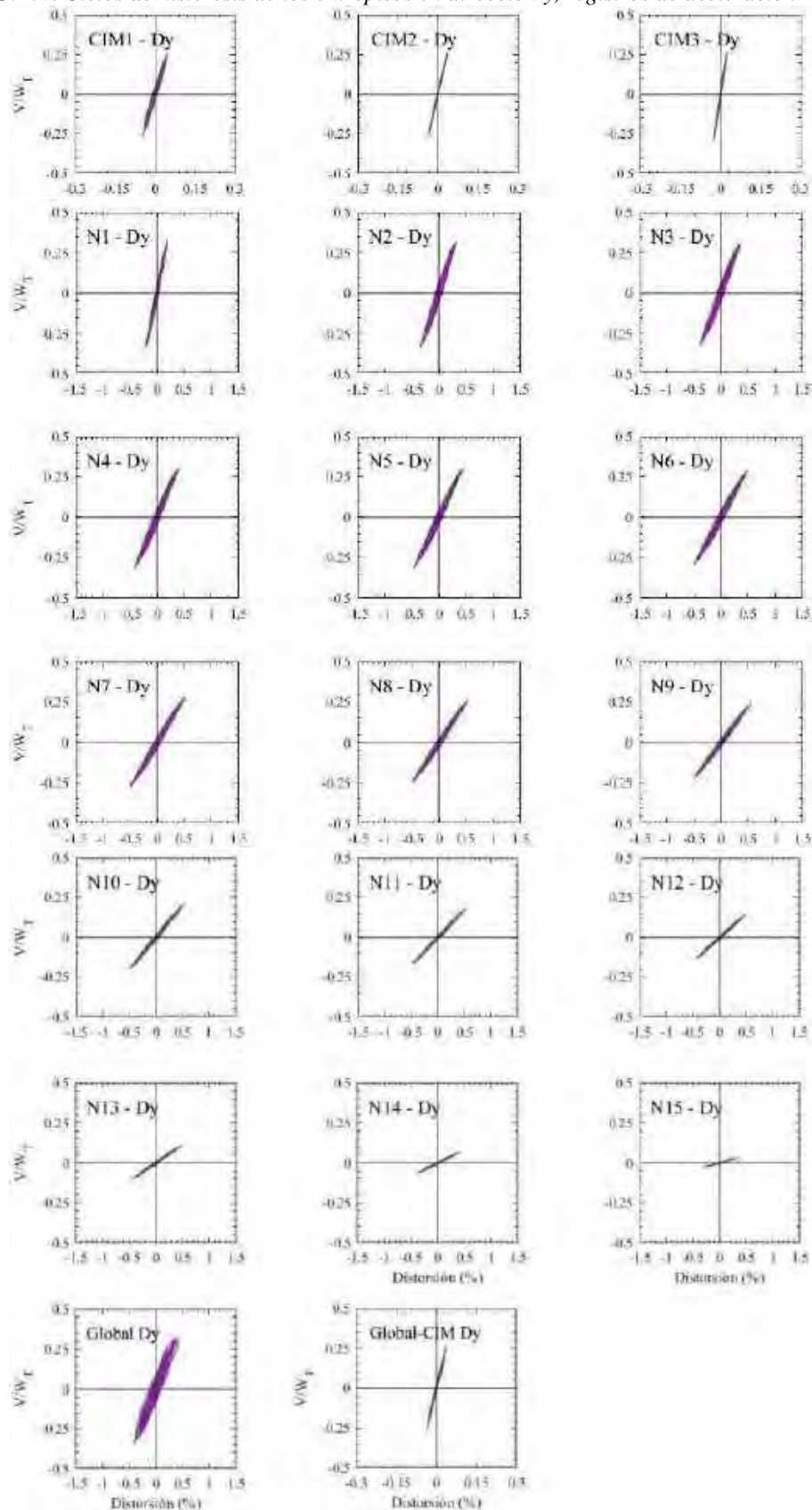


Figura G.181. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración IMSR-A

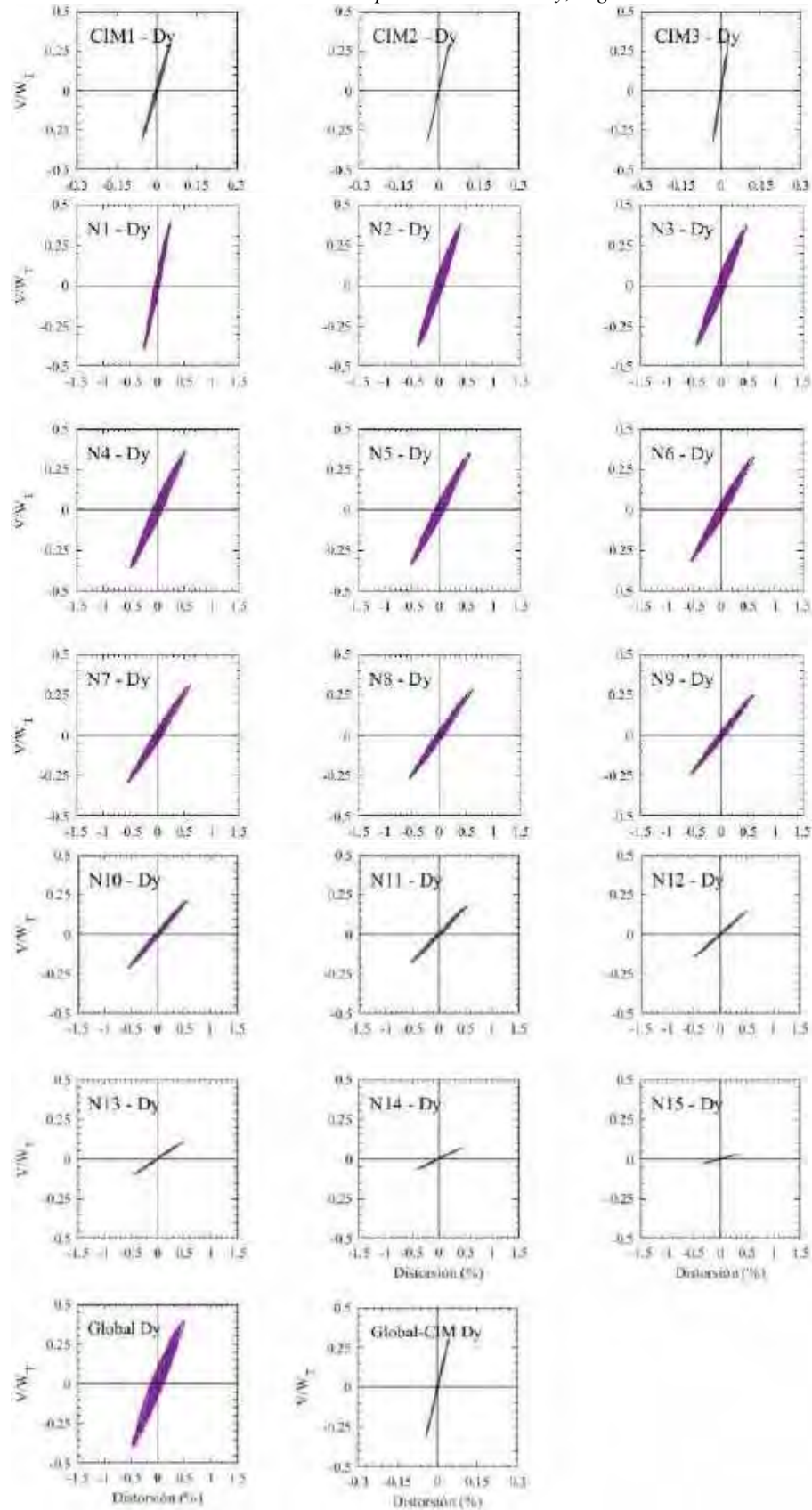


Figura G.182. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración IMSR –B

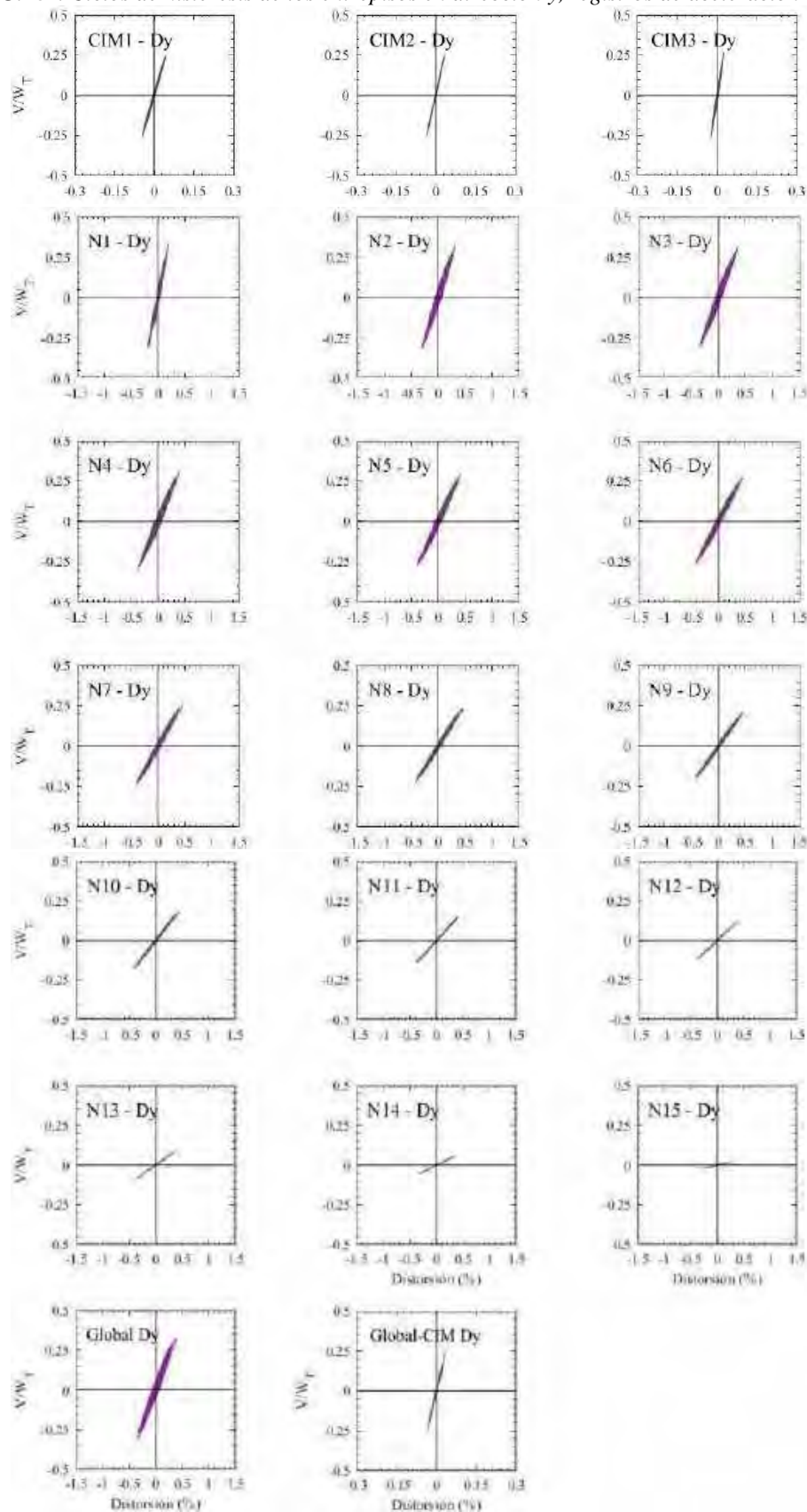


Figura G.183. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración SMR-A

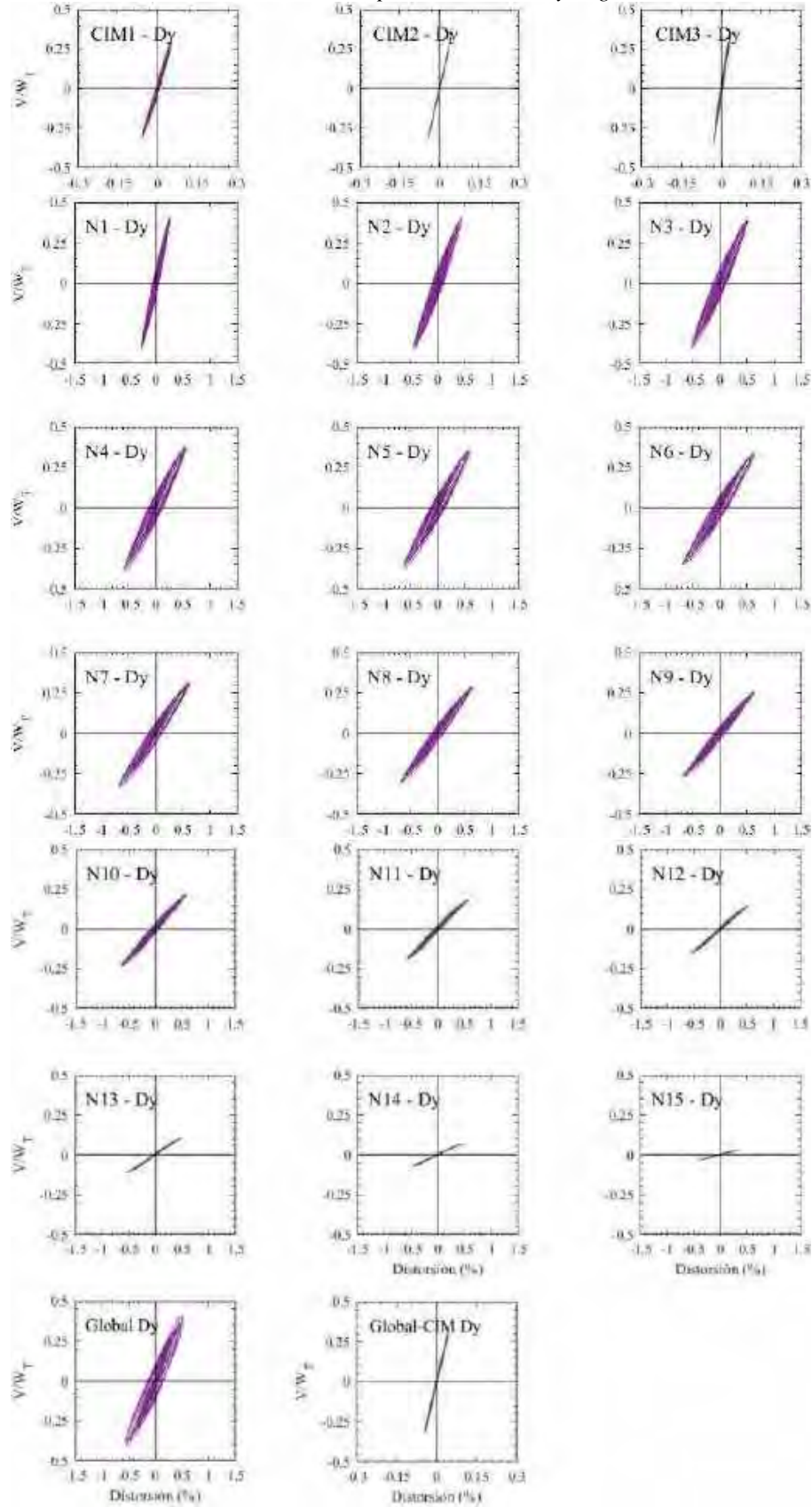


Figura G.184. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración SMR –B

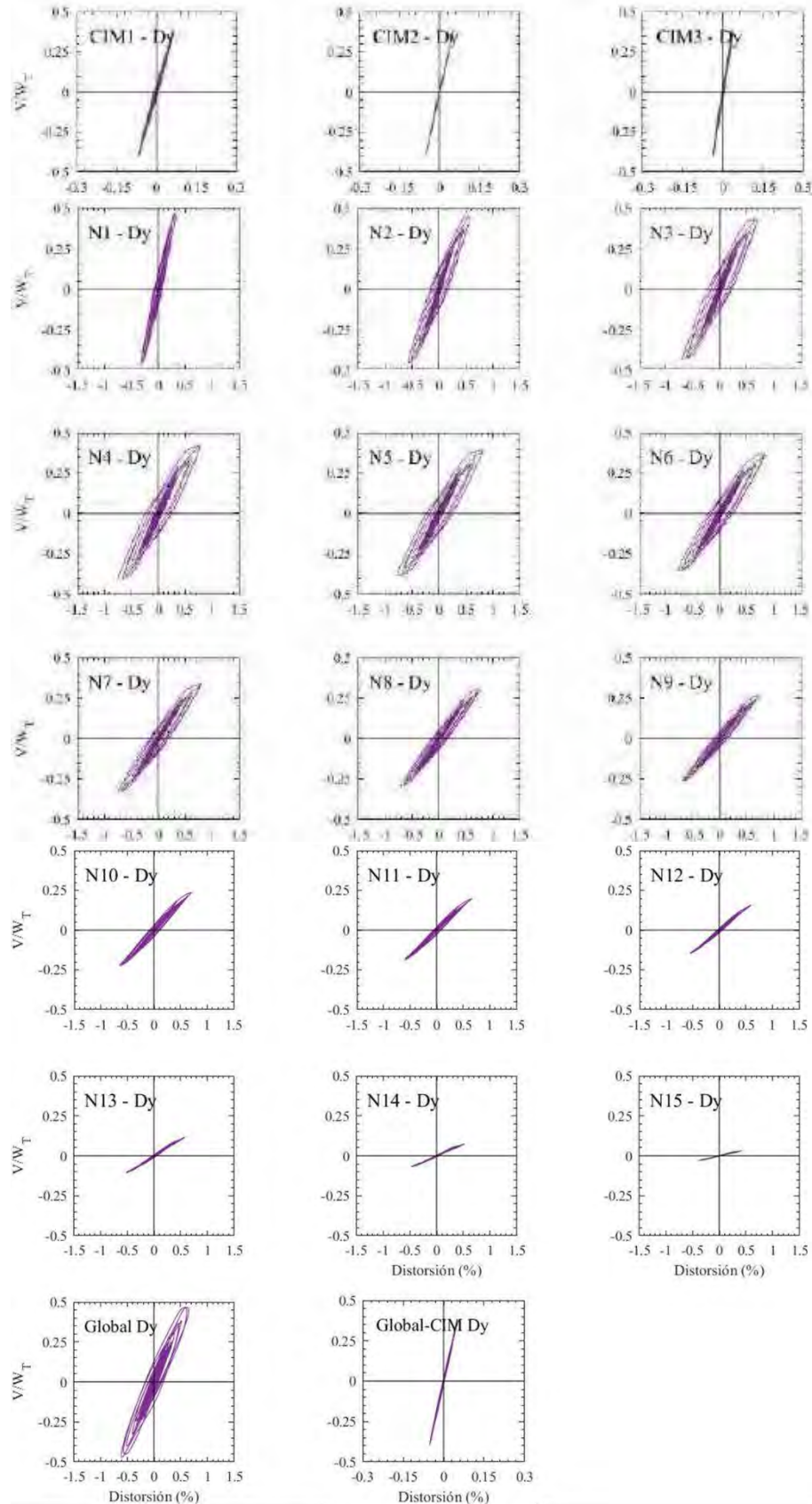


Figura G.185. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración MI15-A

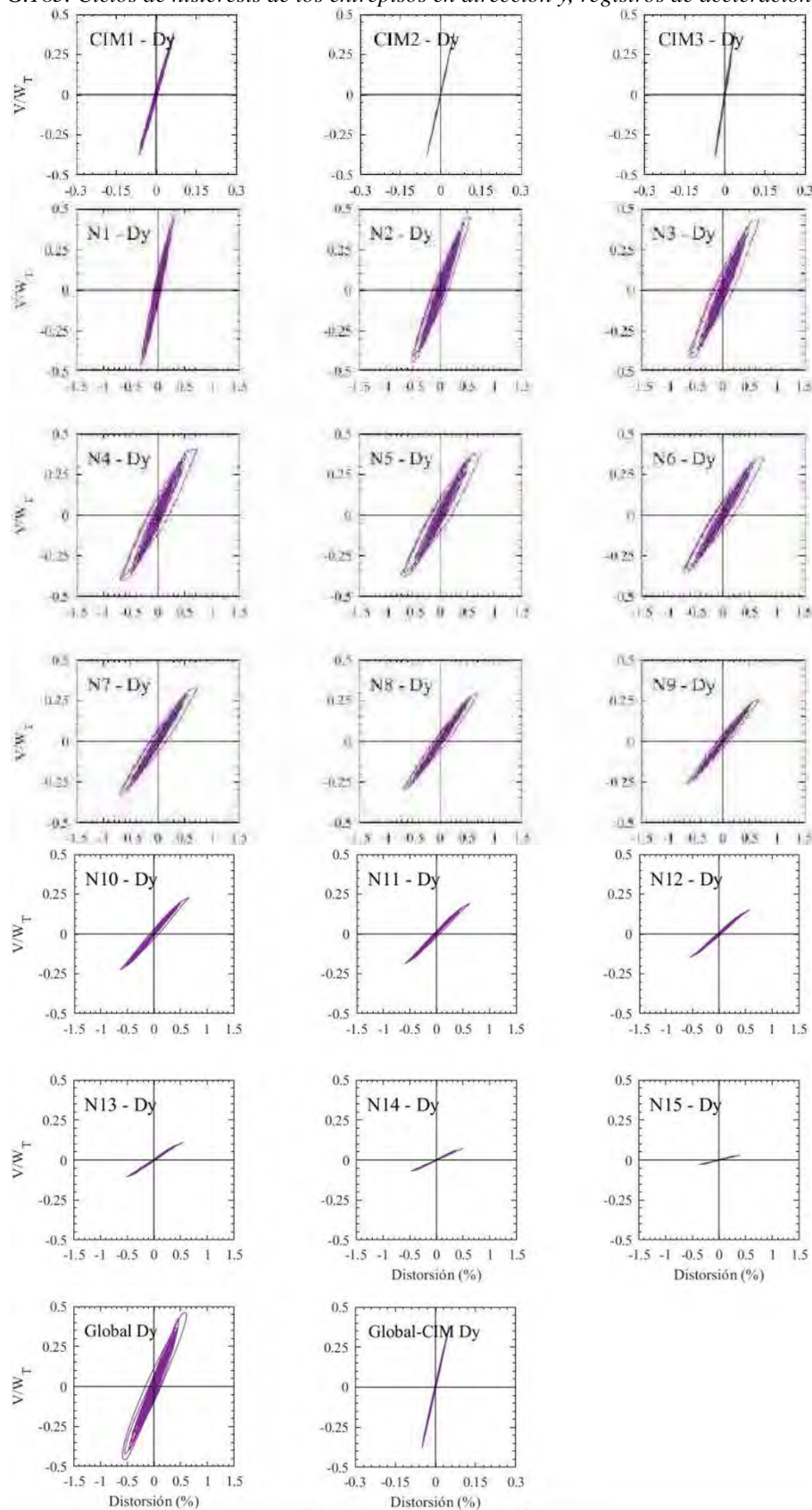


Figura G.186. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración MI15-B

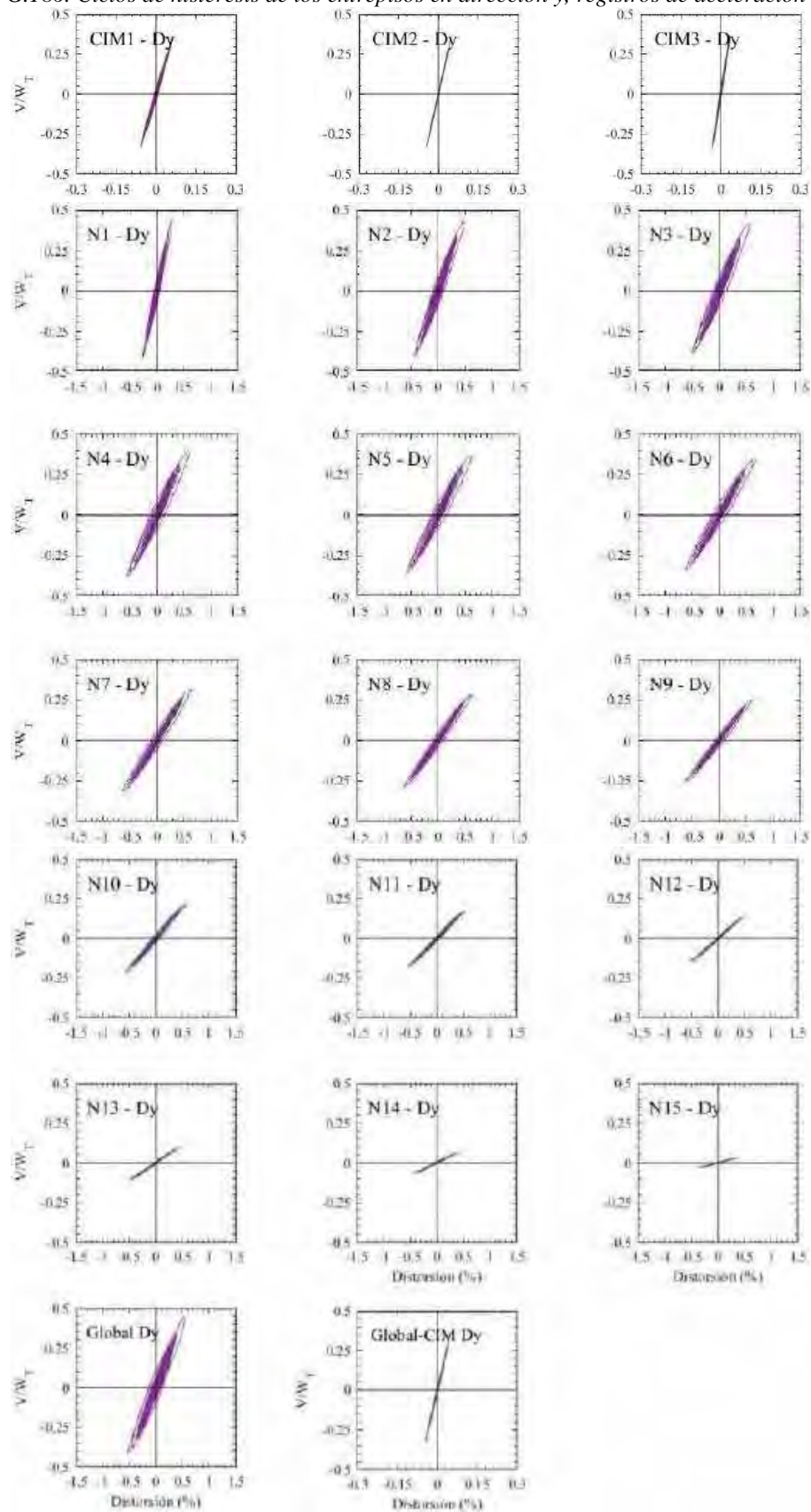


Figura G.187. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CU80-A (2017)

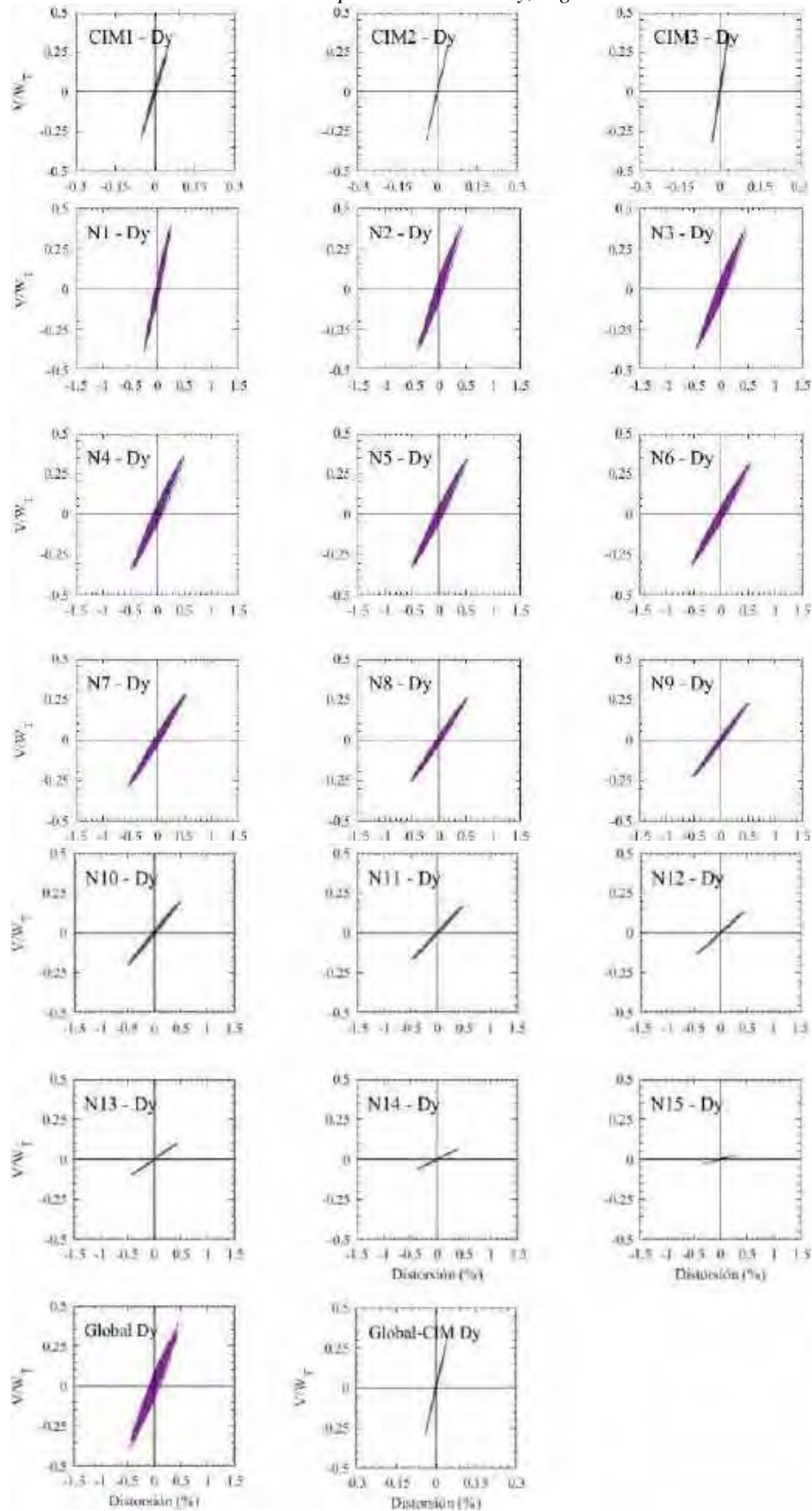


Figura G.188. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CU80-B (2017)

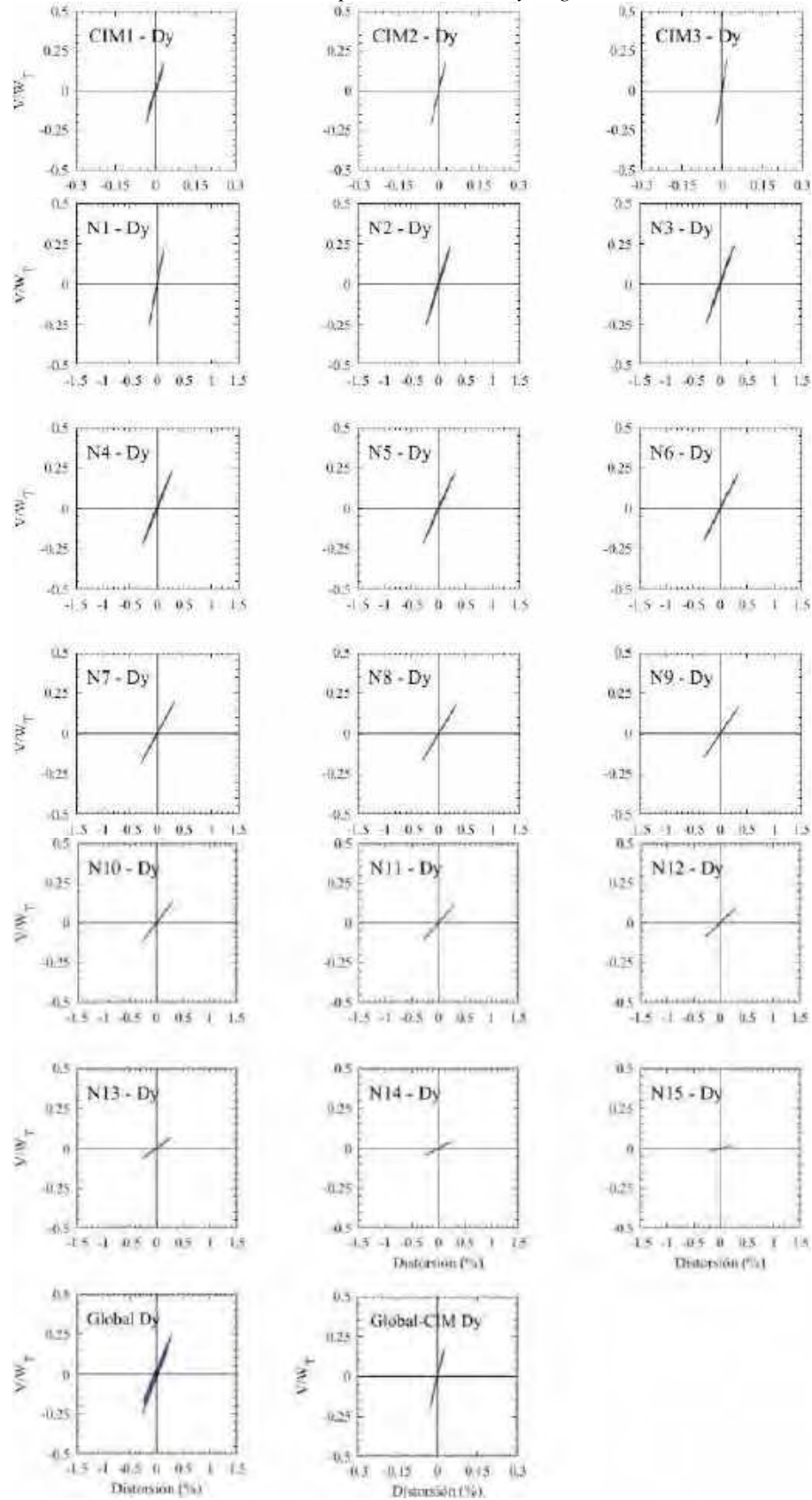


Figura G.189. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración DX37-A (2017)

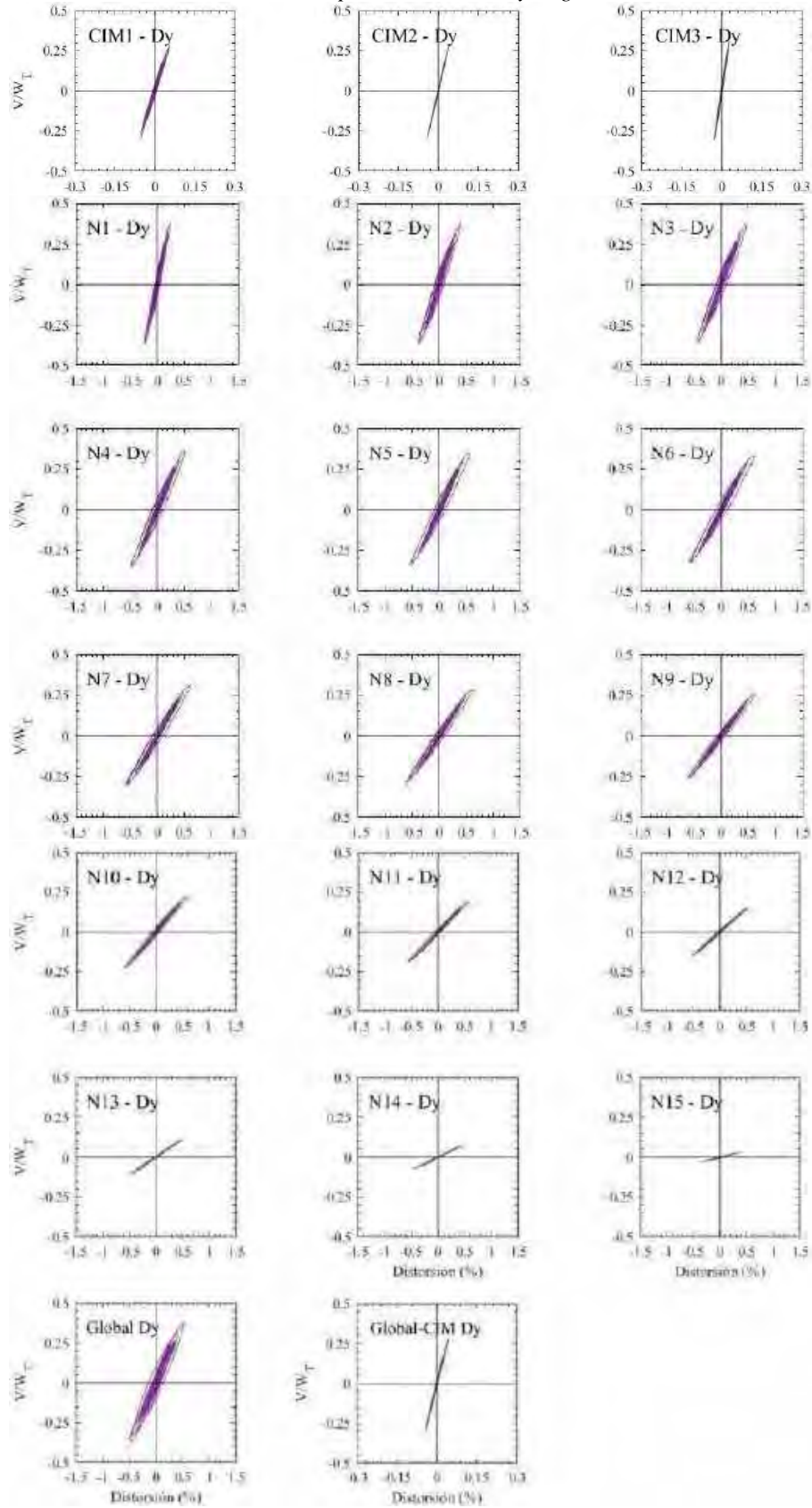


Figura G.190. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración DX37-B (2017)

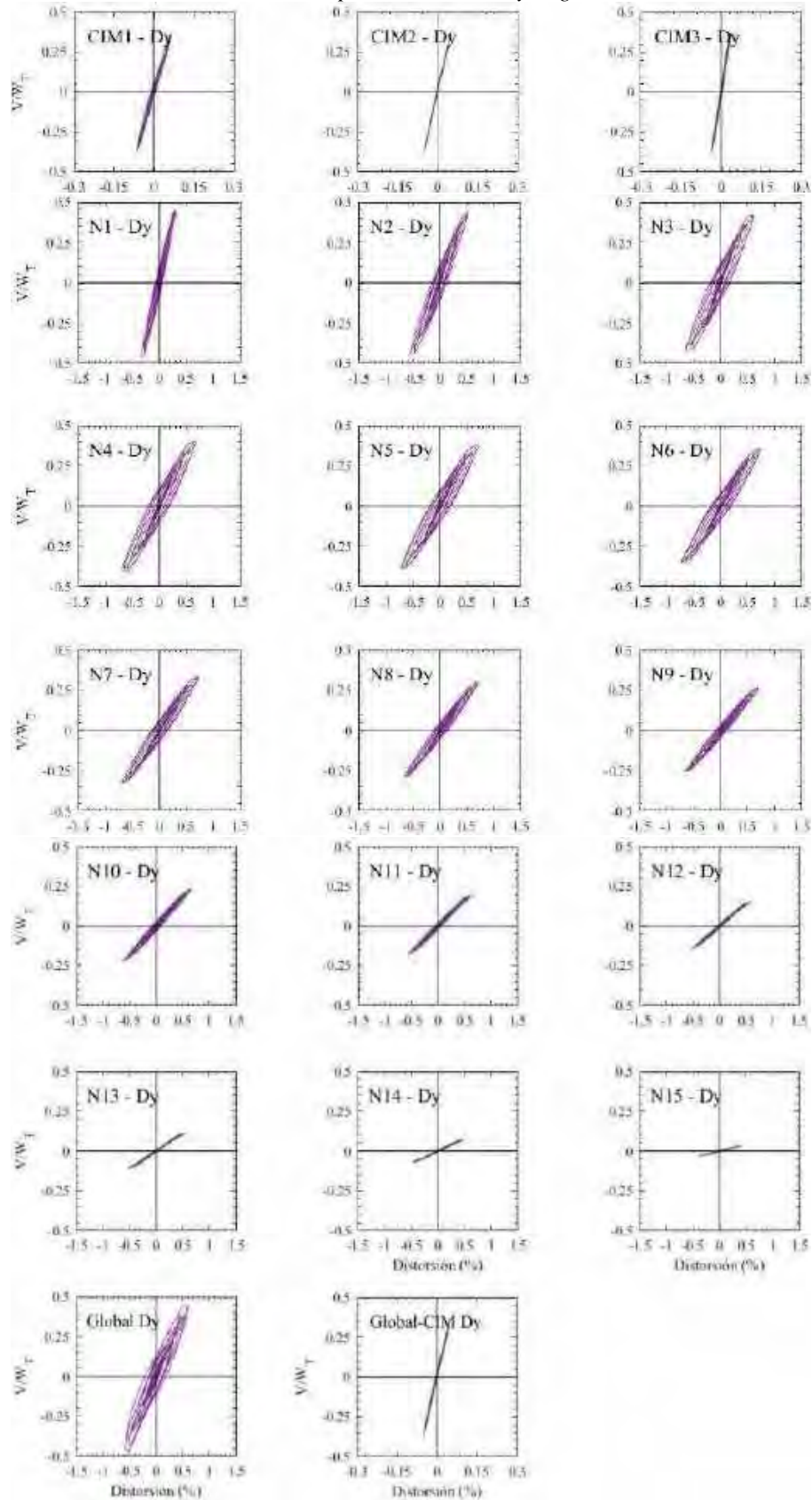


Figura G.191. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración JC54-A (2017)

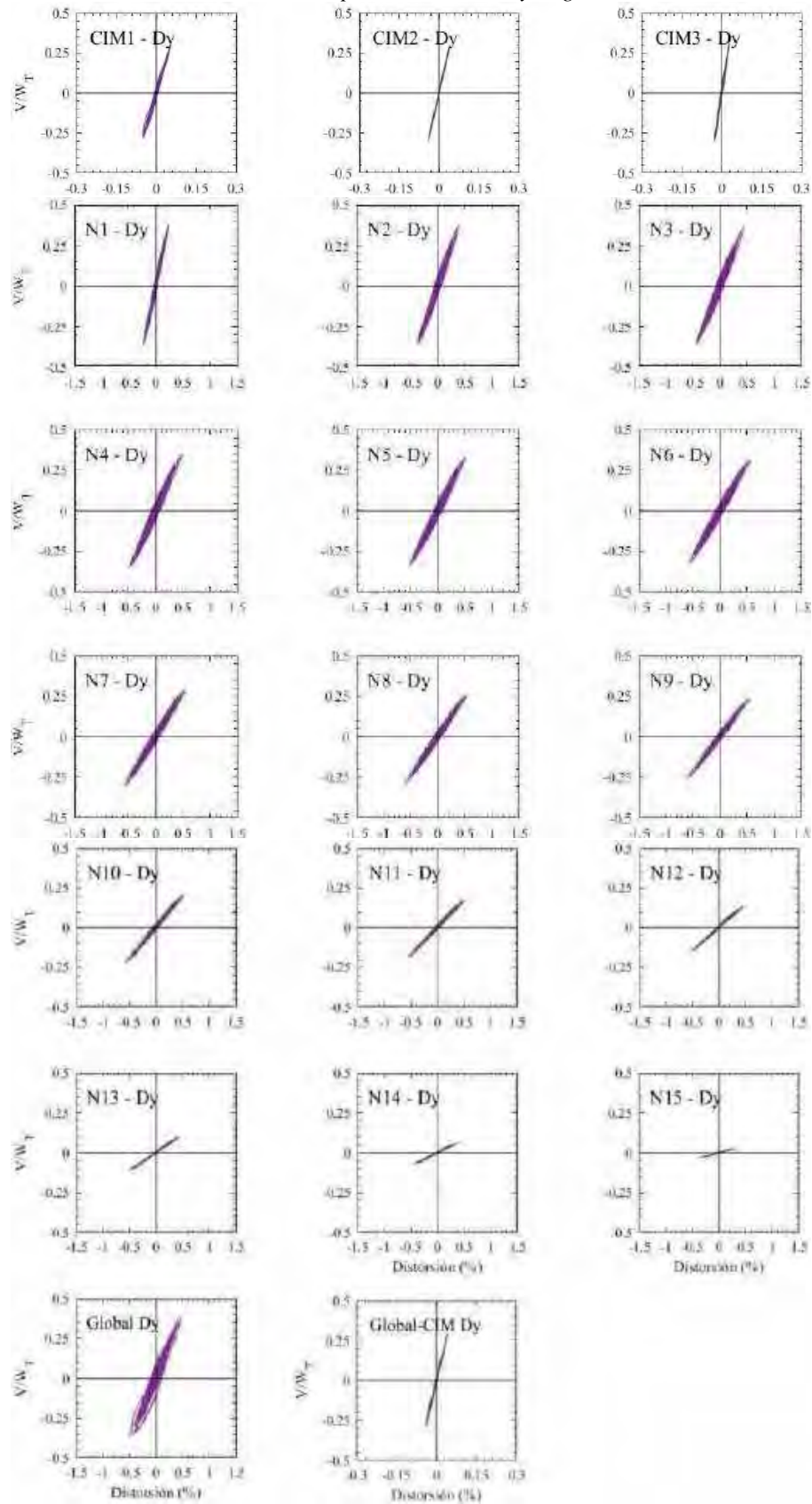


Figura G.192. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.2.5 Mapeos de fluencia en dirección x

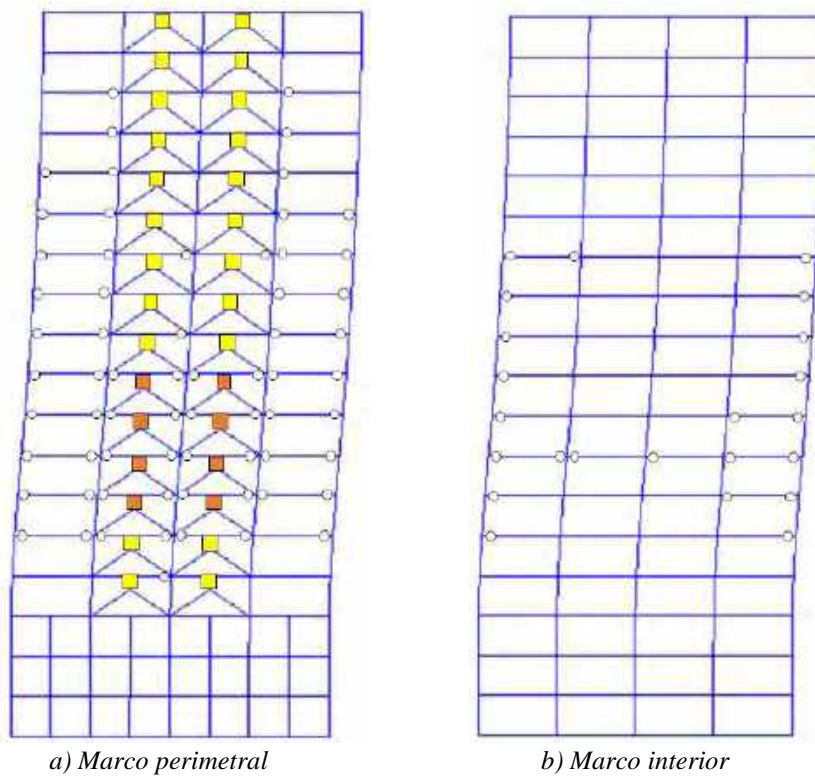


Figura G.193. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CM-A

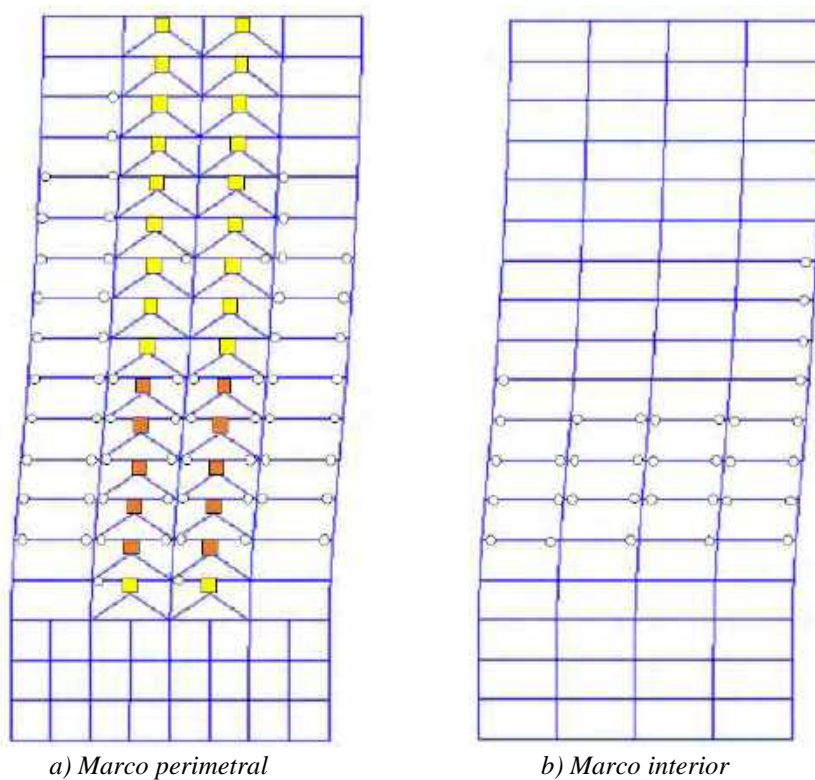
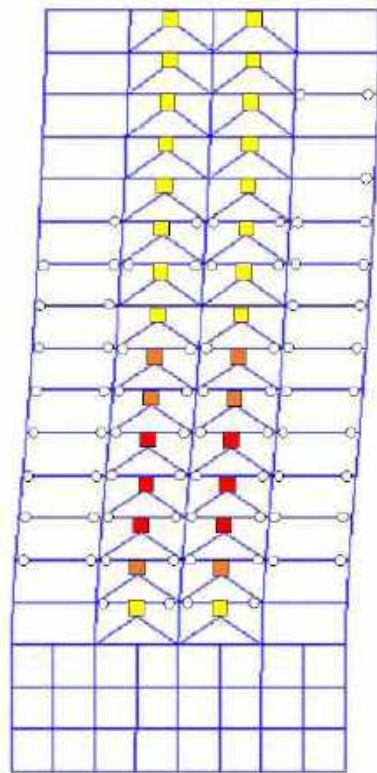
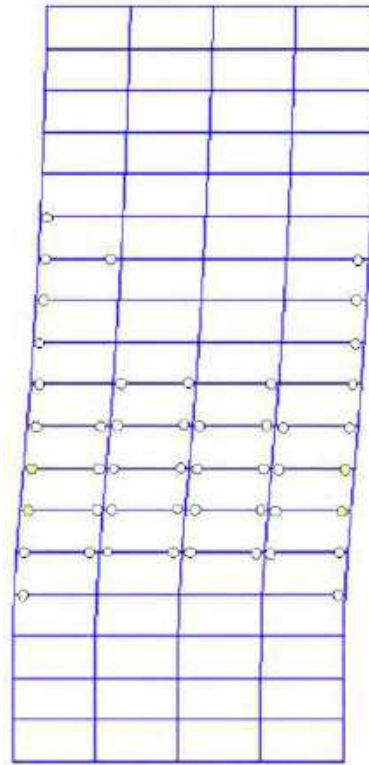


Figura G.194. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CM-B

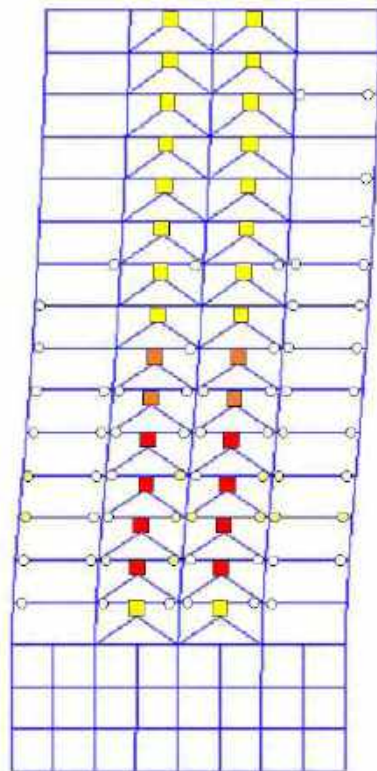


a) Marco perimetral

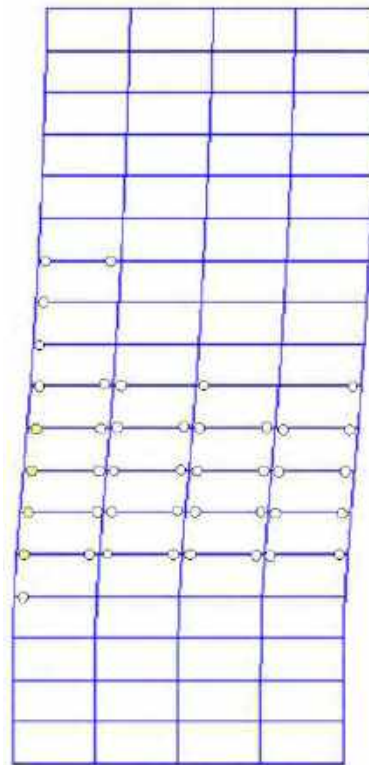


b) Marco interior

Figura G.195. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DFRO-A



a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura G.196. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DFRO –B

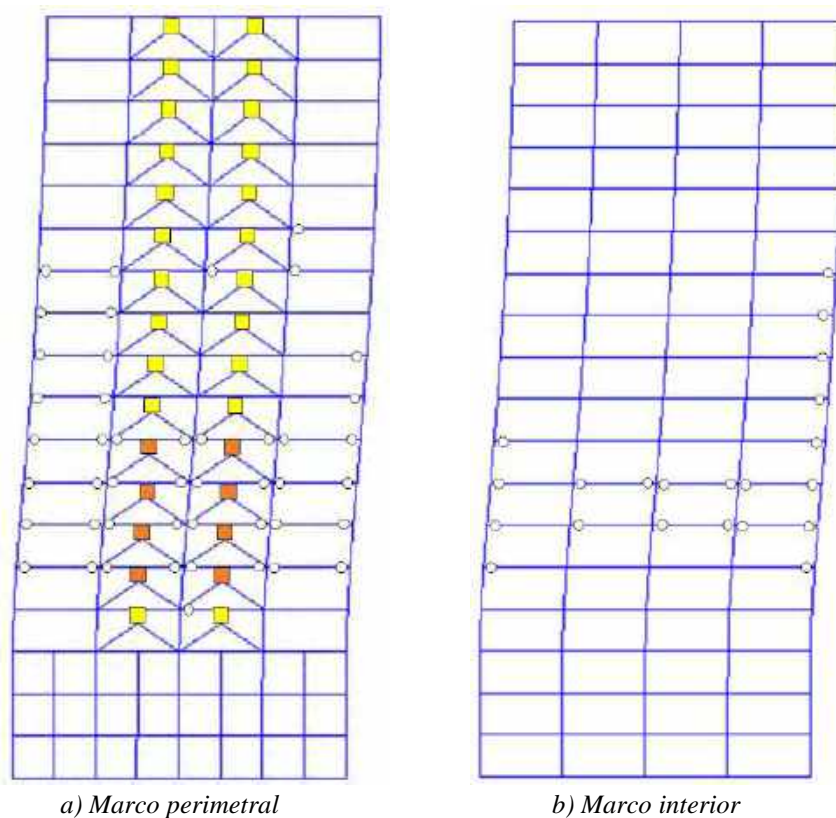


Figura G.197. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración IMSR-A

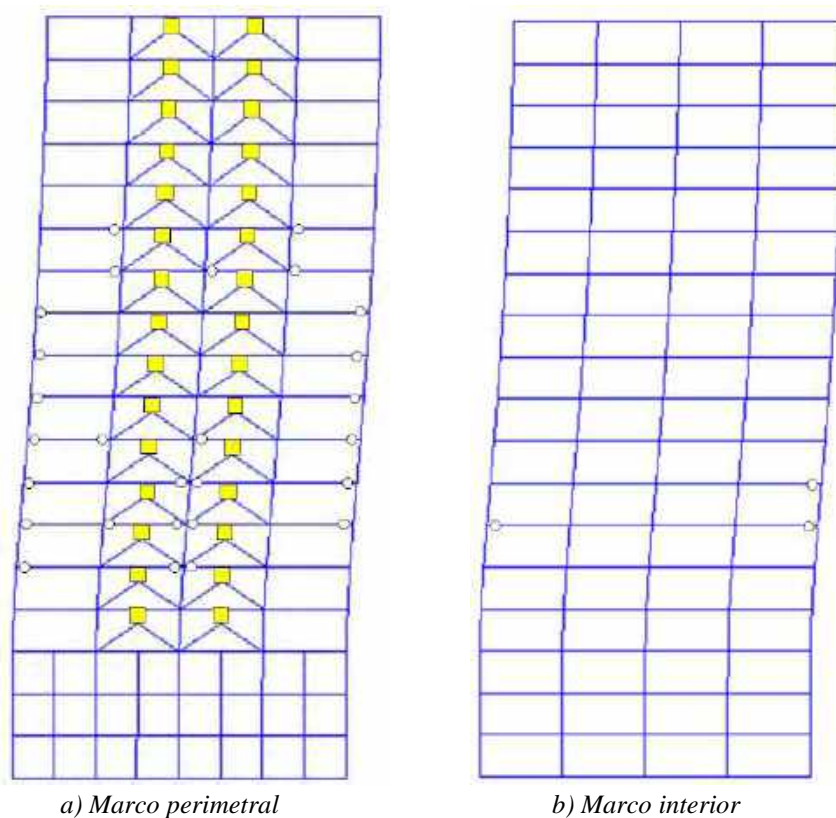


Figura G.198. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración IMSR-B

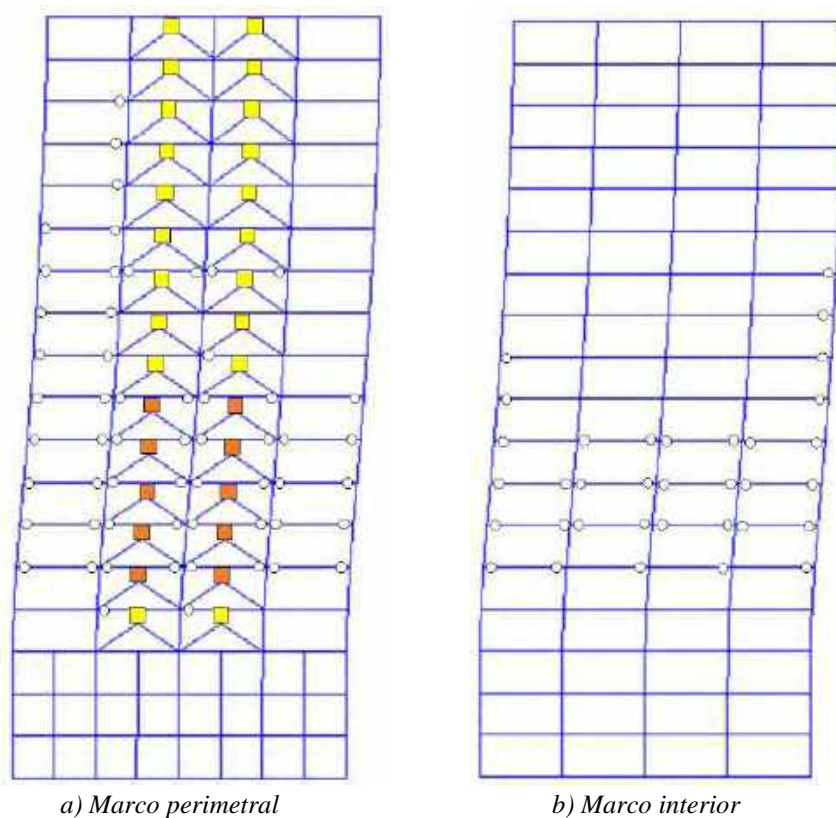


Figura G.199. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SMR-A

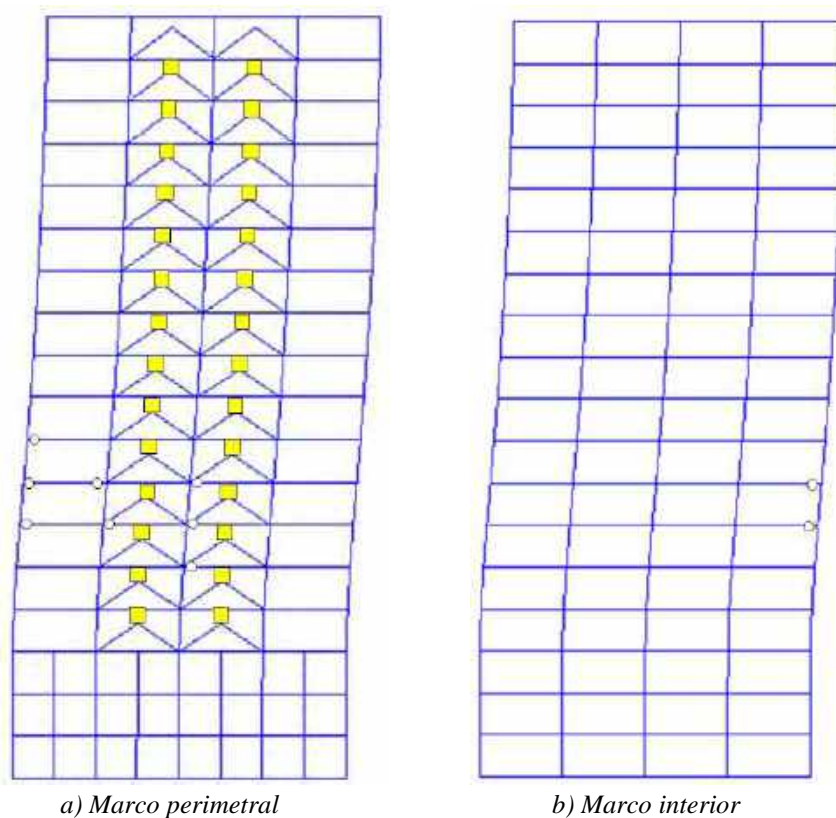
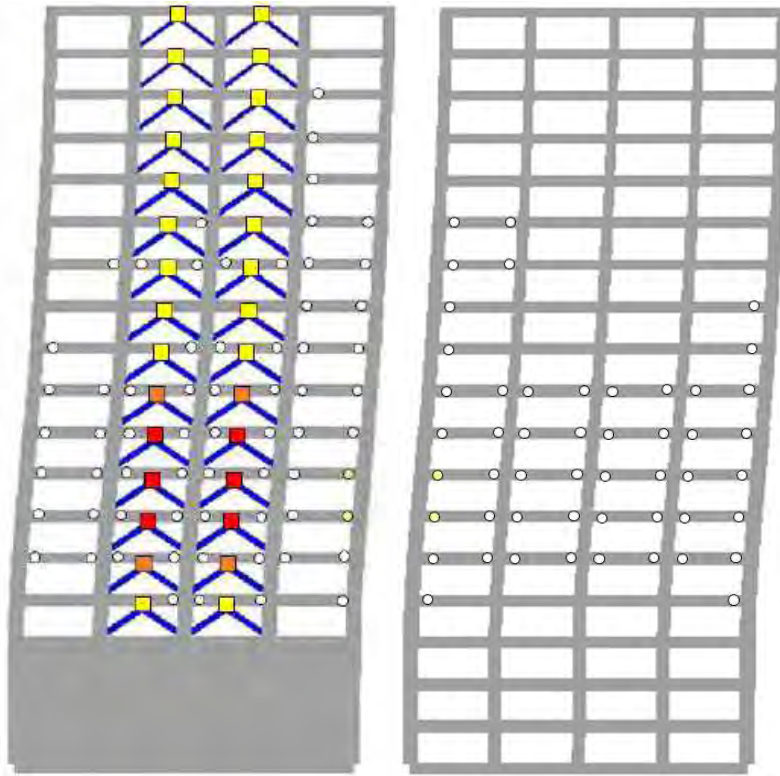


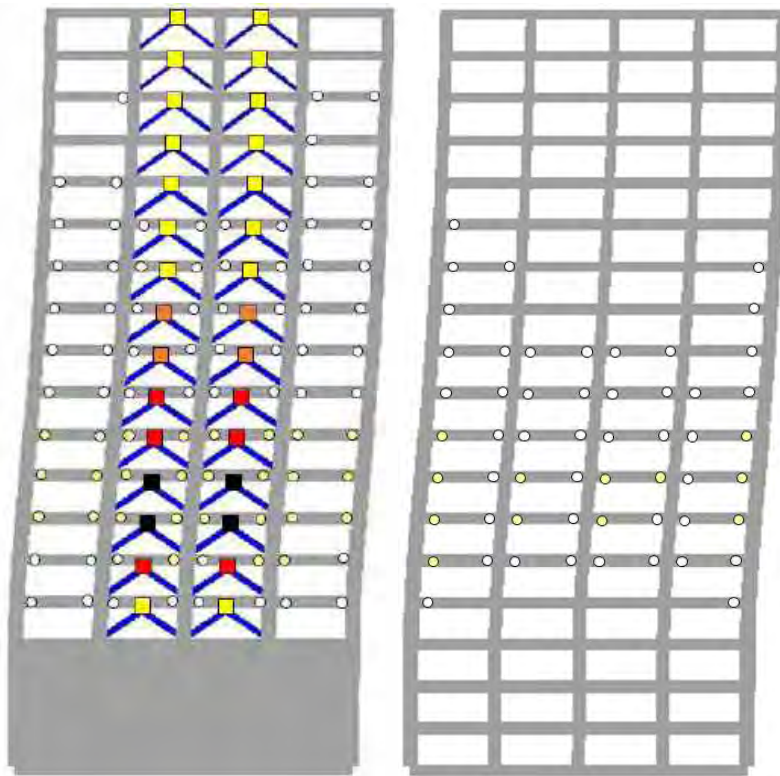
Figura G.200. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SMR -B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

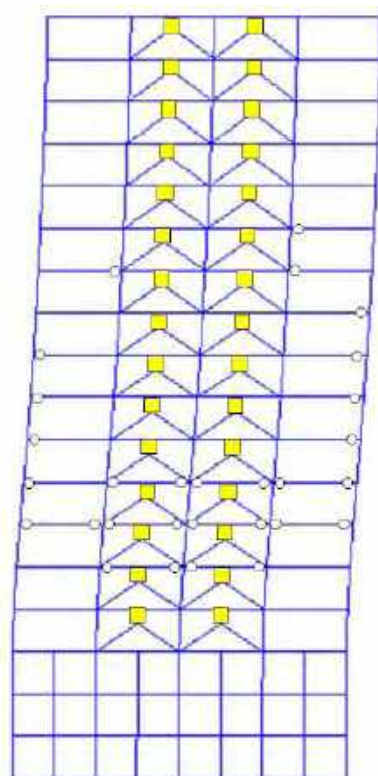
Figura G.201. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-A



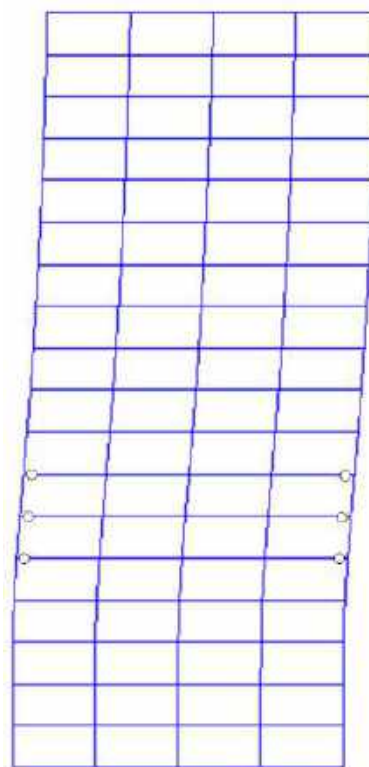
a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura G.202. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-B

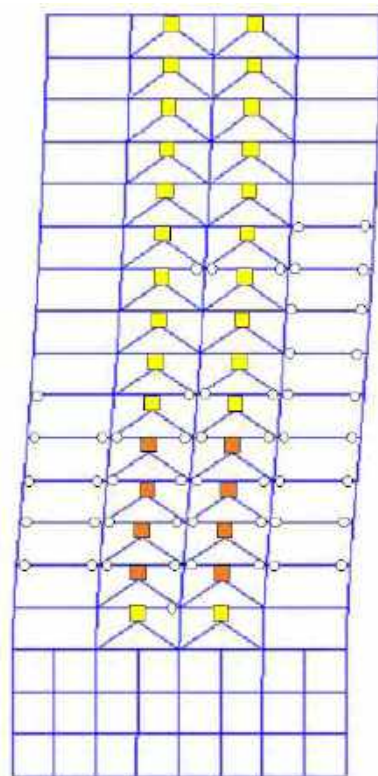


a) Marco perimetral

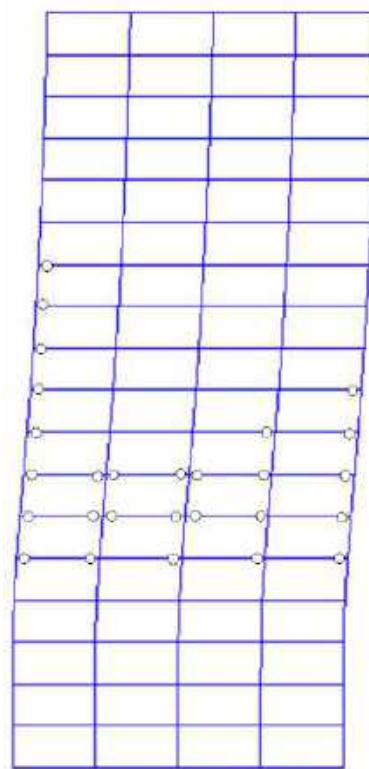


b) Marco interior

Figura G.203. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CU80-A (2017)

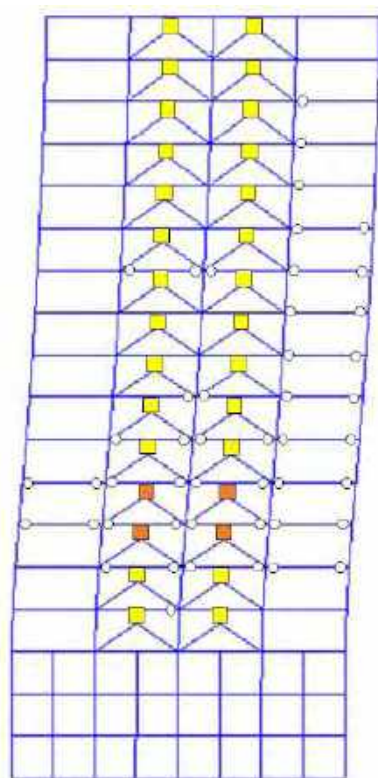


a) Marco perimetral

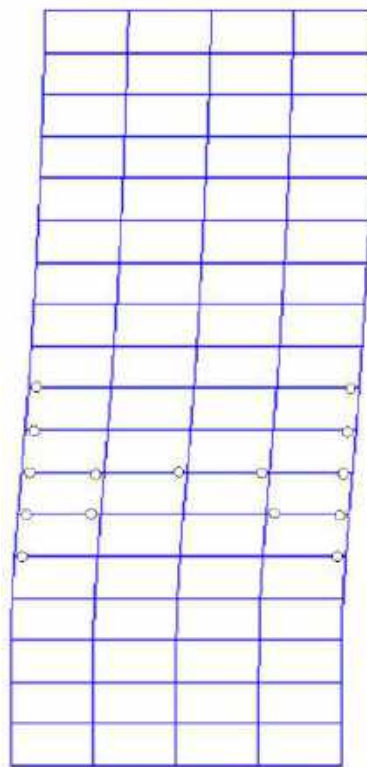


b) Marco interior

Figura G.204. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CU80-B (2017)

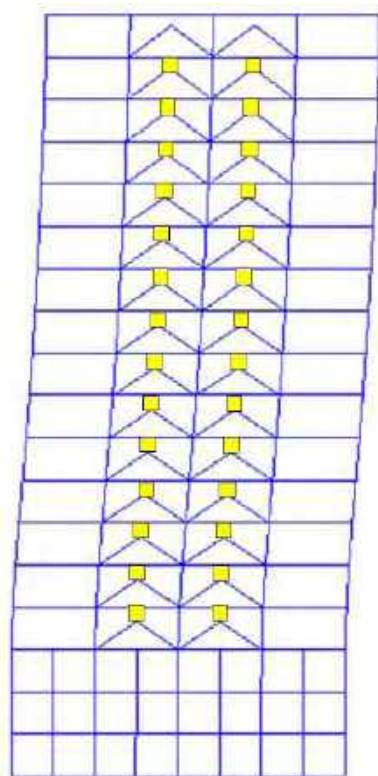


a) Marco perimetral

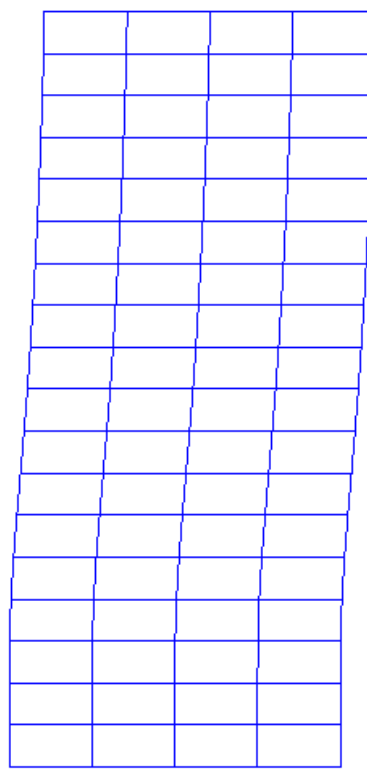


b) Marco interior

Figura G.205. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DX37-A (2017)

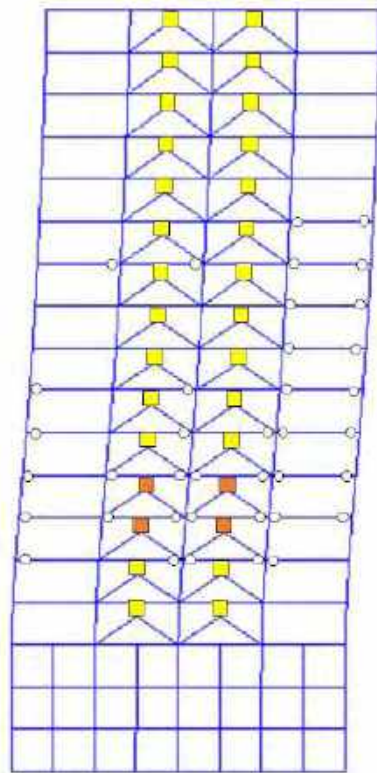


a) Marco perimetral

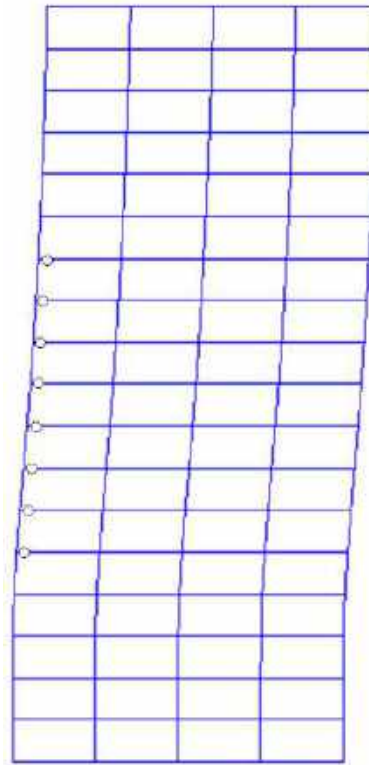


b) Marco interior

Figura G.206. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DX37-B (2017)

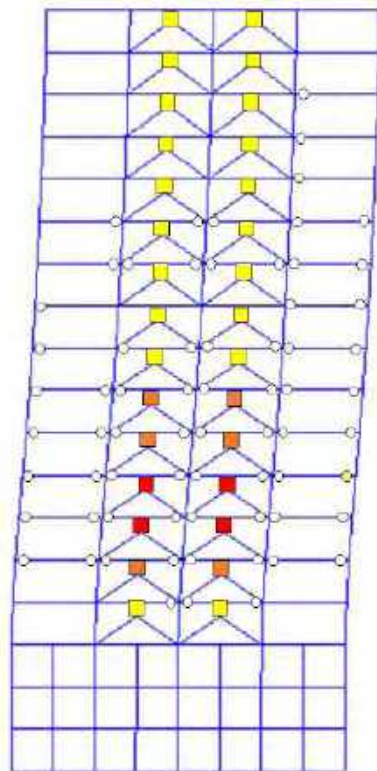


a) Marco perimetral

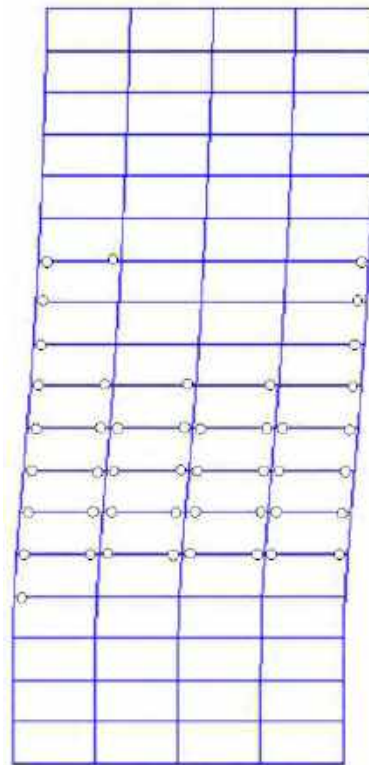


b) Marco interior

Figura G.207. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración JC54-A (2017)



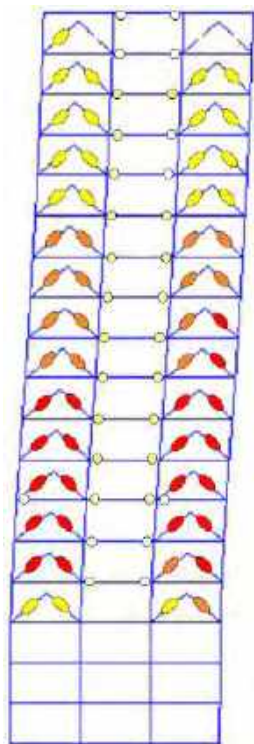
a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura G.208. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.2.6 Mapeos de fluencia en dirección y

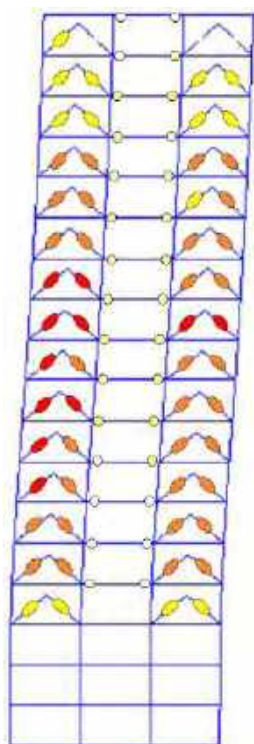


a) Marco perimetral

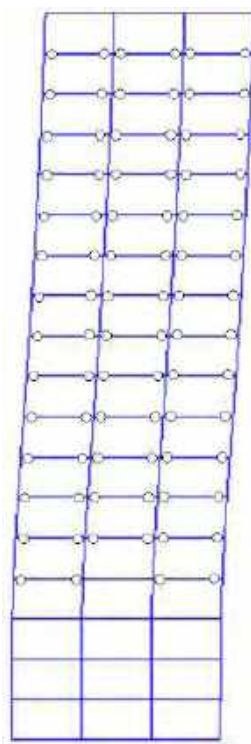


b) Marco interior

Figura G.209. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CM-A

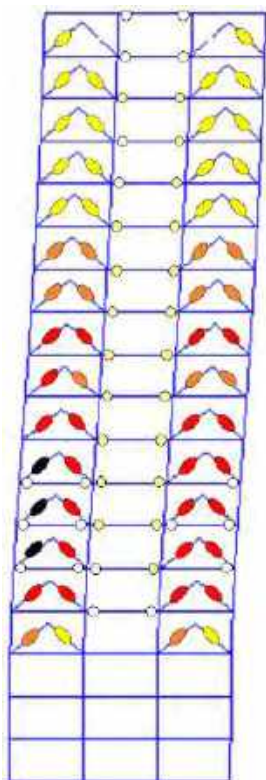


a) Marco perimetral

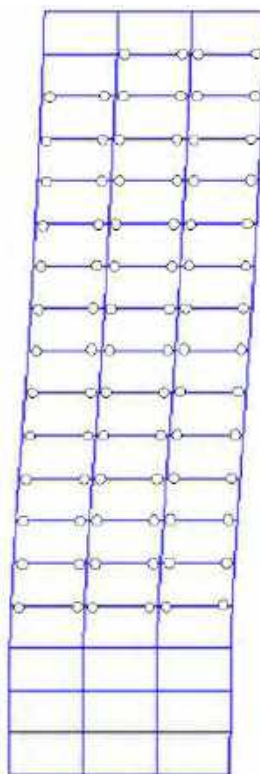


b) Marco interior

Figura G.210. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CM-B

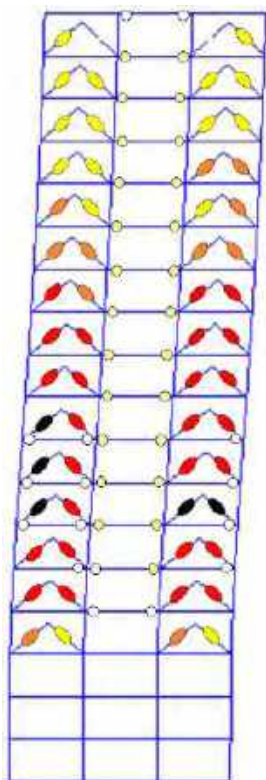


a) Marco perimetral

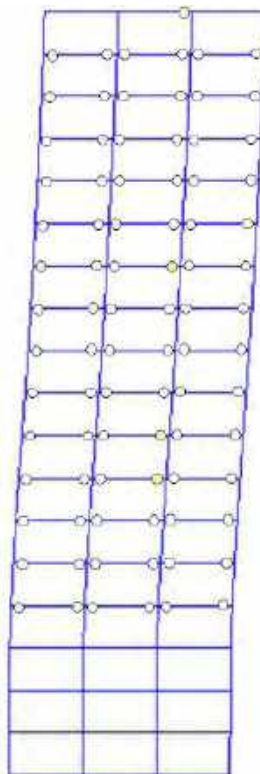


b) Marco interior

Figura G.211. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DFRO-A

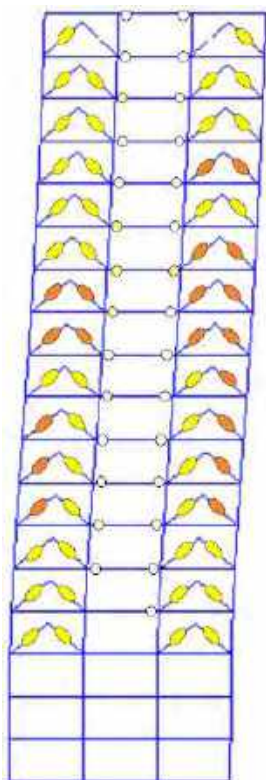


a) Marco perimetral

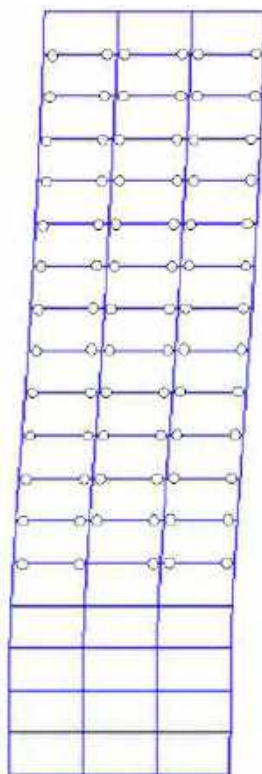


b) Marco interior

Figura G.212. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DFRO -B

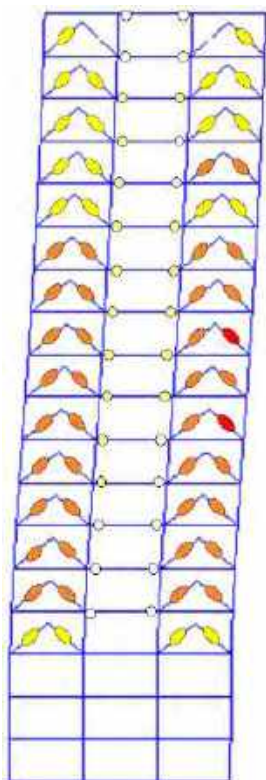


a) Marco perimetral

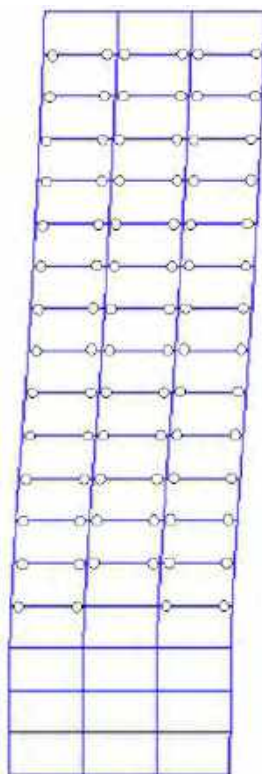


b) Marco interior

Figura G.213. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración IMSR-A

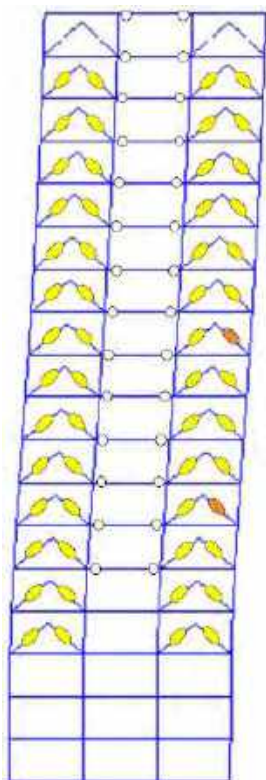


a) Marco perimetral

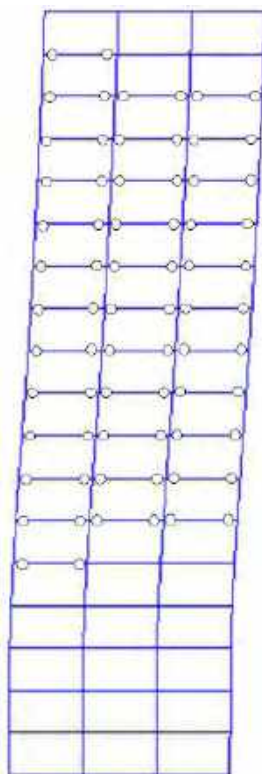


b) Marco interior

Figura G.214. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración IMSR-B

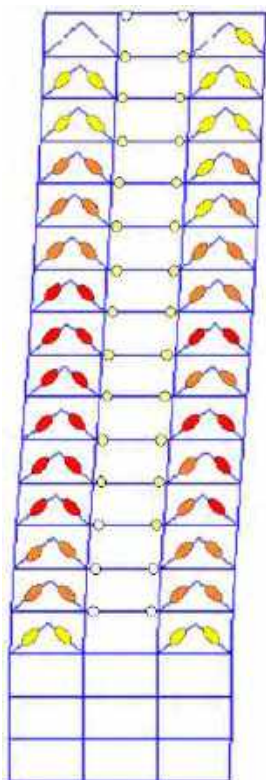


a) Marco perimetral

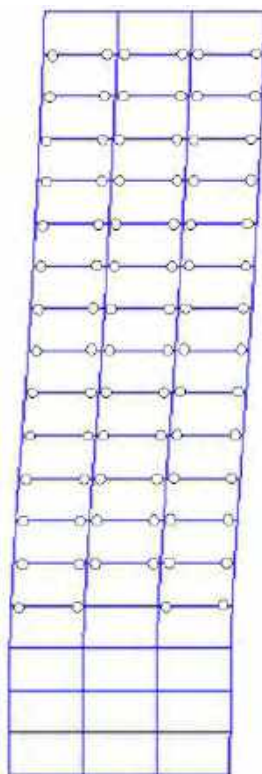


b) Marco interior

Figura G.215. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SMR-A



a) Marco perimetral

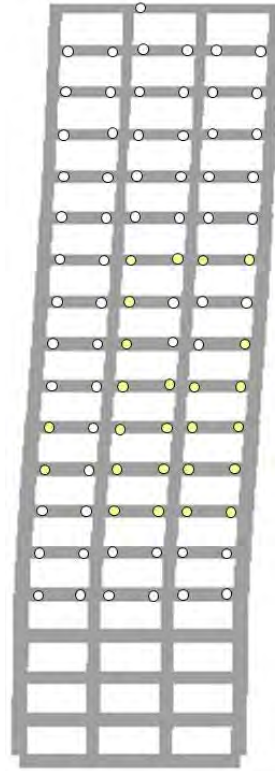


b) Marco interior

Figura G.216. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SMR -B



a) Marco perimetral

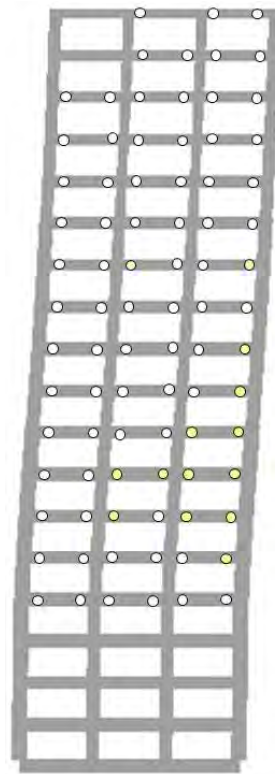


b) Marco interior

Figura G.217. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-A

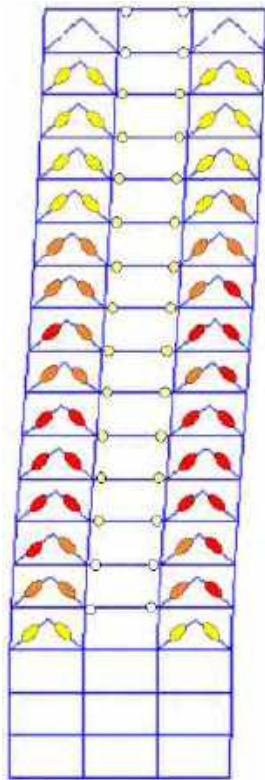


a) Marco perimetral

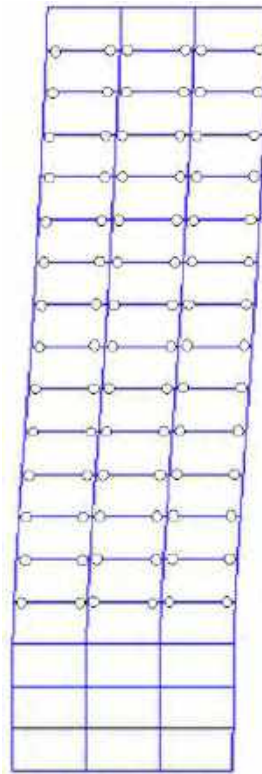


b) Marco interior

Figura G.218. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-B

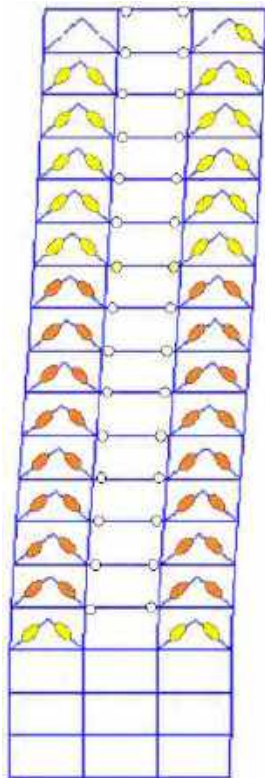


a) Marco perimetral

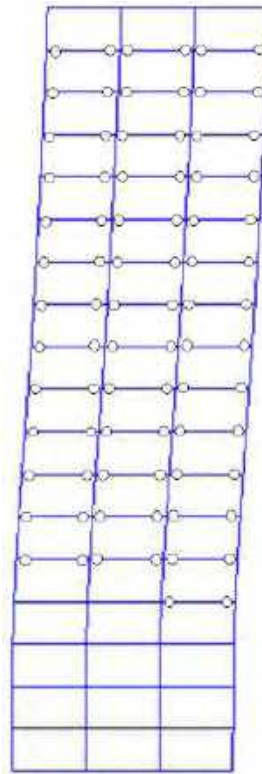


b) Marco interior

Figura G.219. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CU80-A (2017)

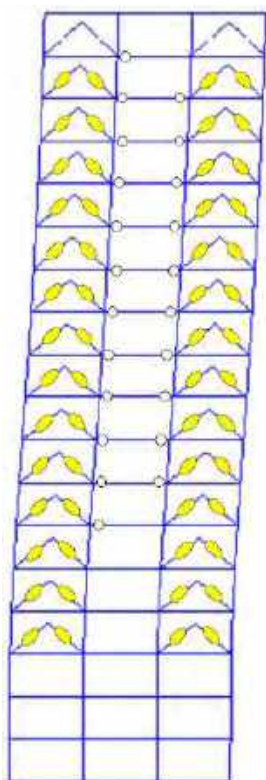


a) Marco perimetral

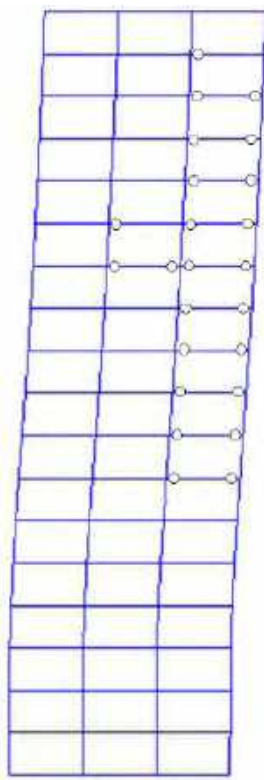


b) Marco interior

Figura G.220. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CU80-B (2017)

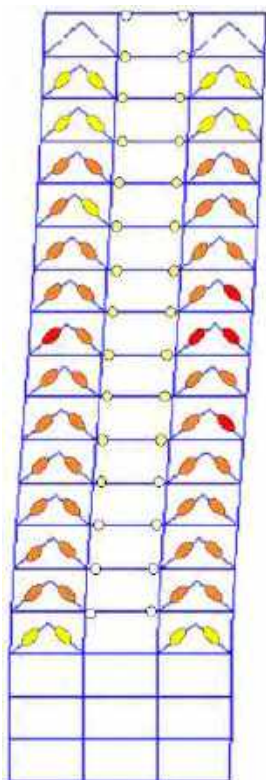


a) Marco perimetral

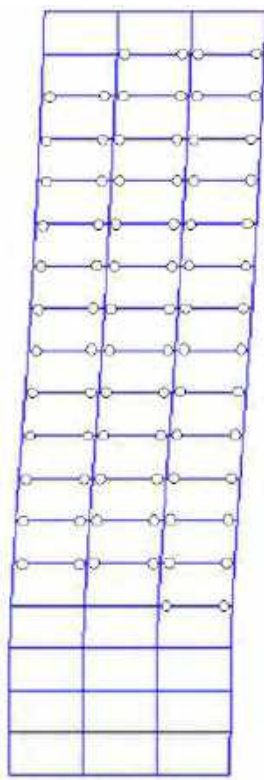


b) Marco interior

Figura G.221. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DX37-A (2017)

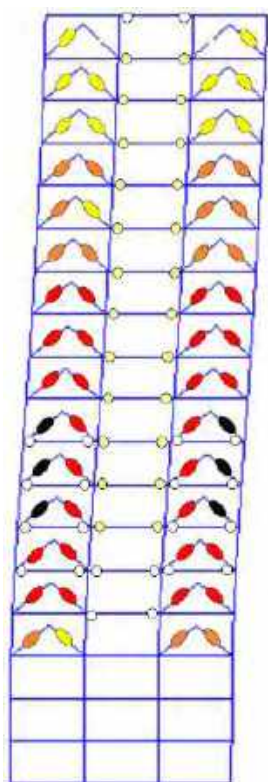


a) Marco perimetral

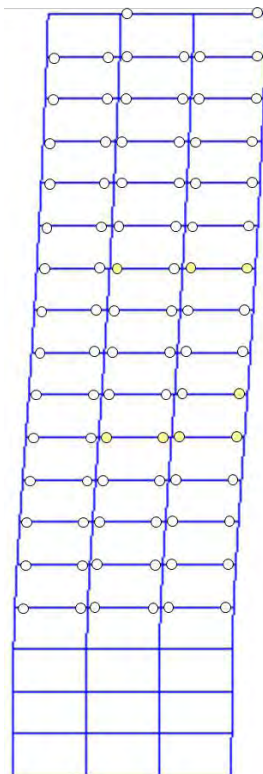


b) Marco interior

Figura G.222. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración DX37-B (2017)

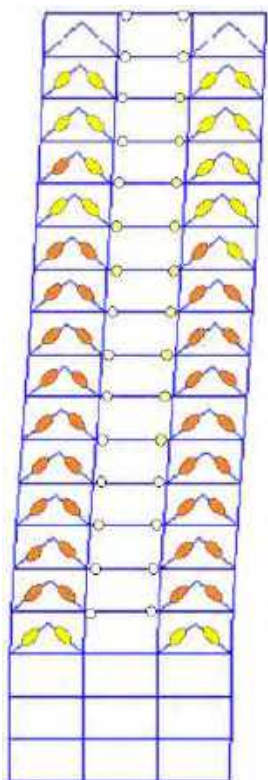


a) Marco perimetral

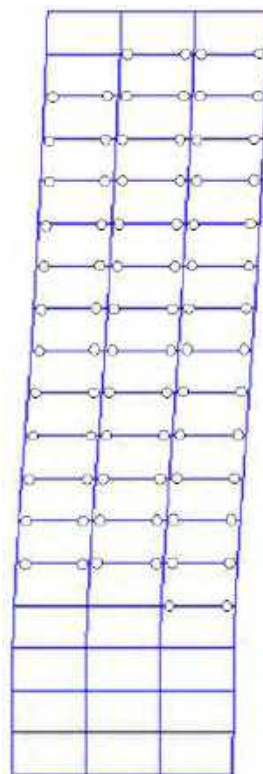


b) Marco interior

Figura G.223. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración JC54-A (2017)



a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura G.224. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.2.7 Respuesta Global

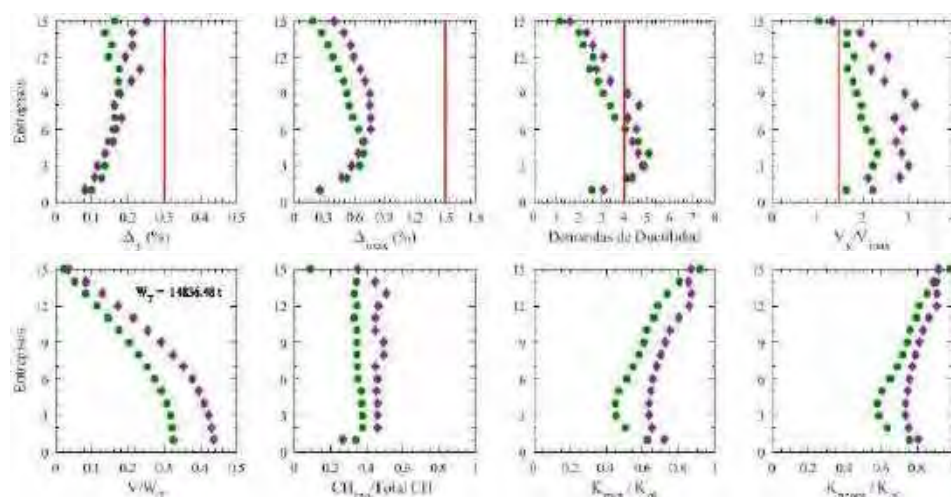


Figura G.225. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CM-A

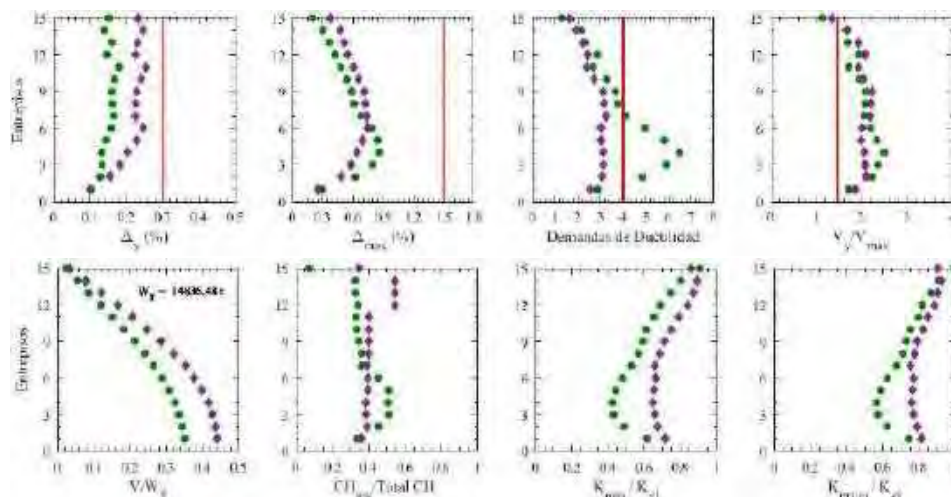


Figura G.226. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CM-B

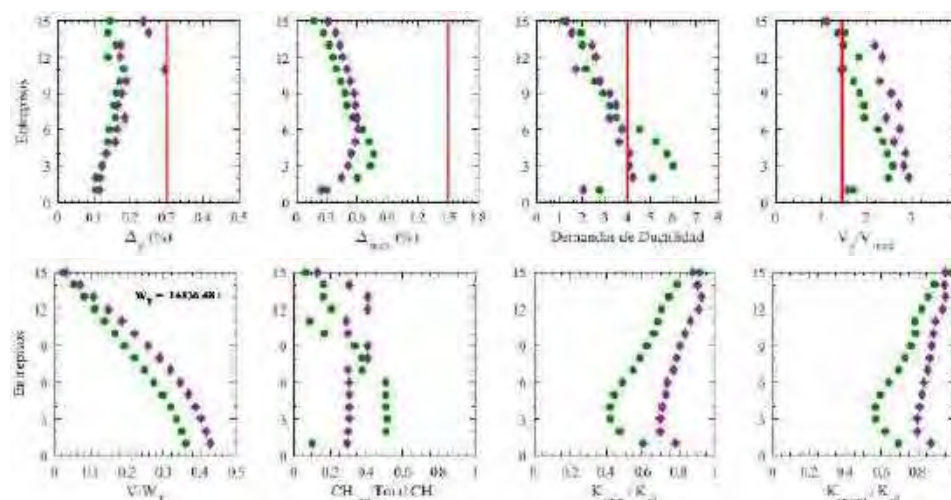


Figura G.227. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CM-C

Figura G.227. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DFRO-A

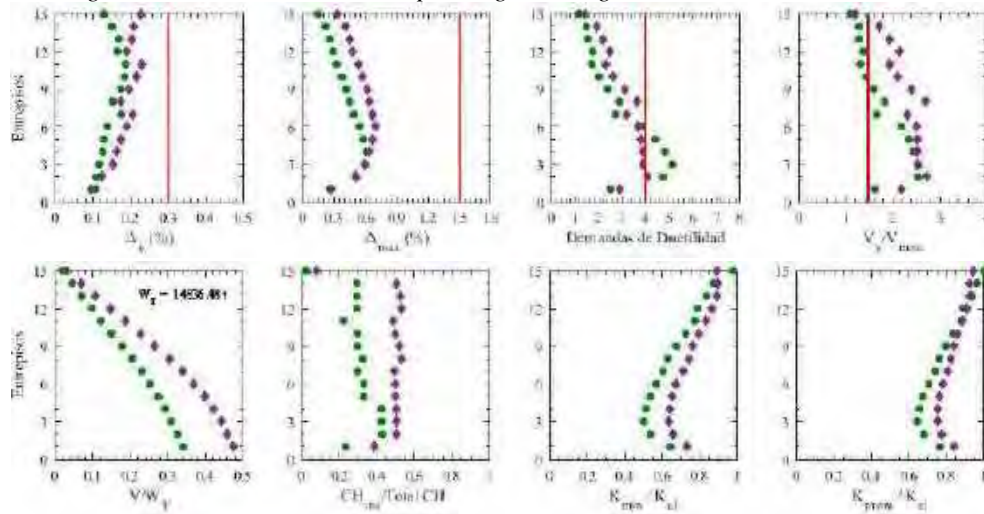


Figura G.228. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DFRO –B

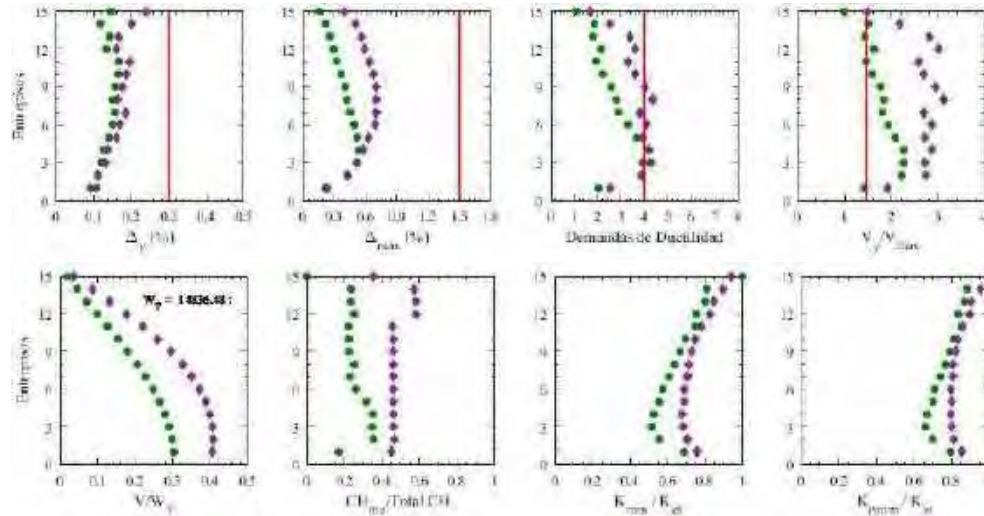


Figura G.229. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración IMSR-A

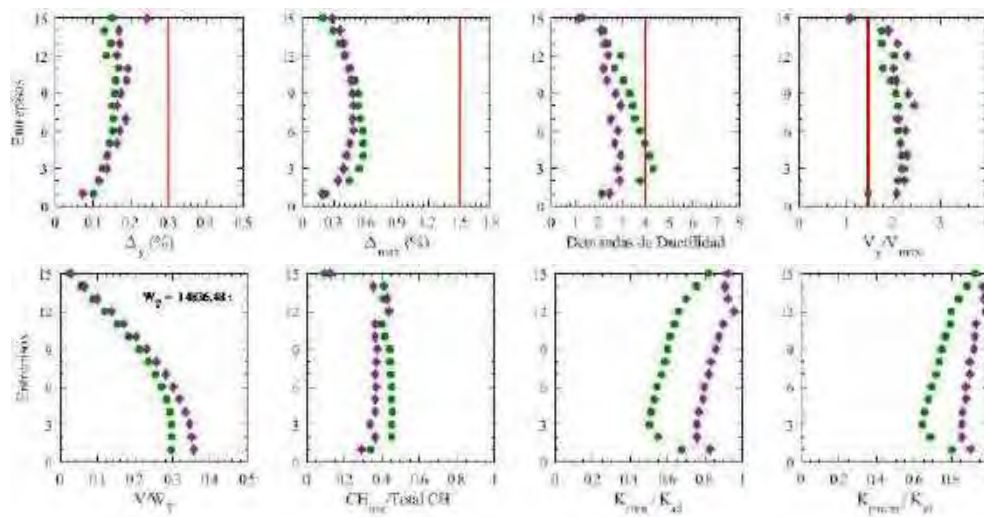


Figura G.230. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración IMSR –B

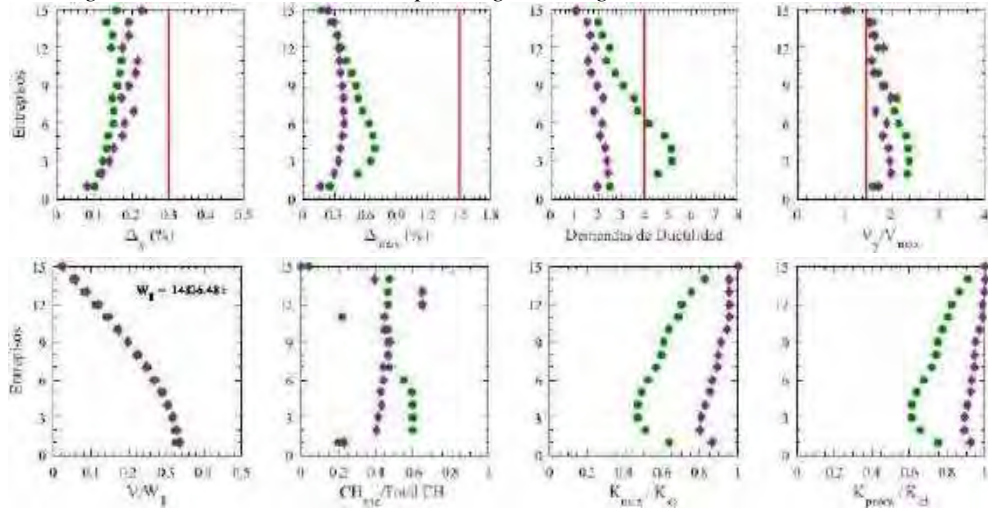


Figura G.231. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración SMR-A

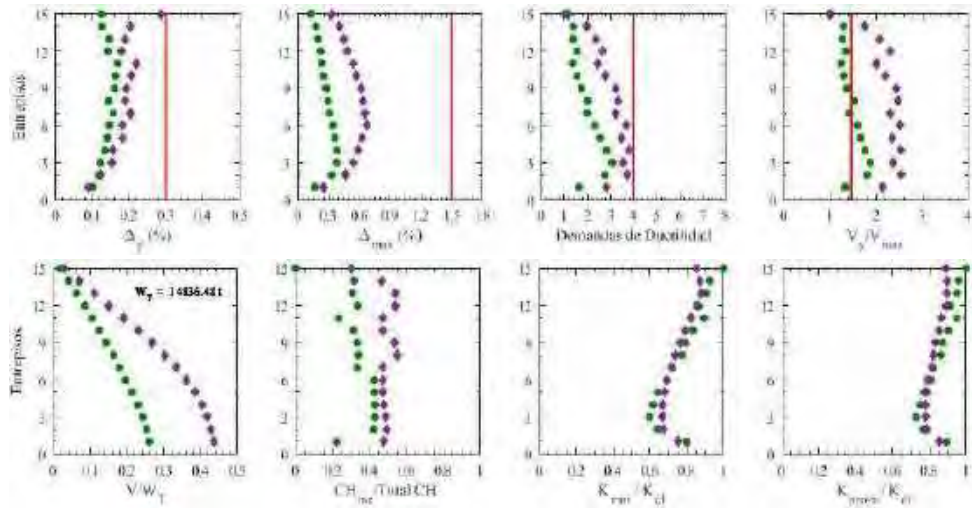


Figura G.232. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración SMR –B

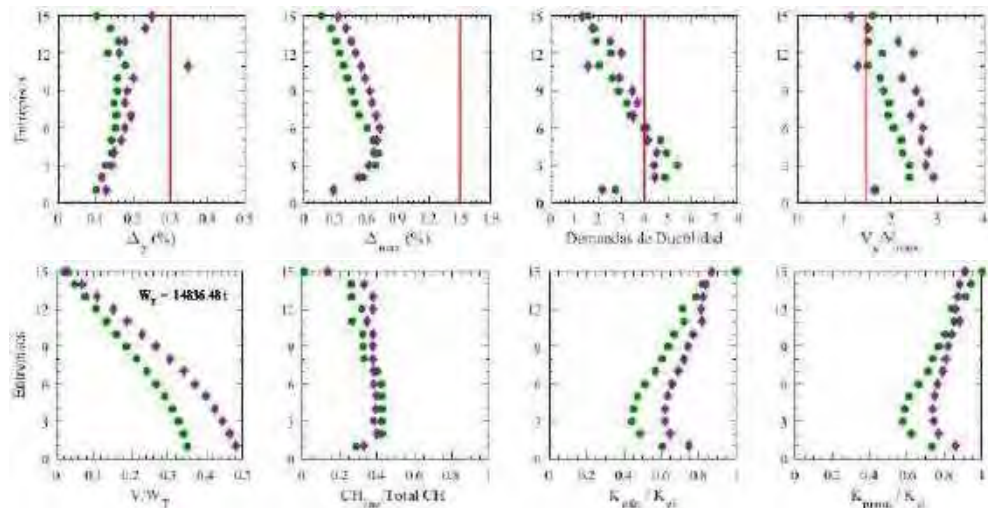


Figura G.233. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración MI15-A

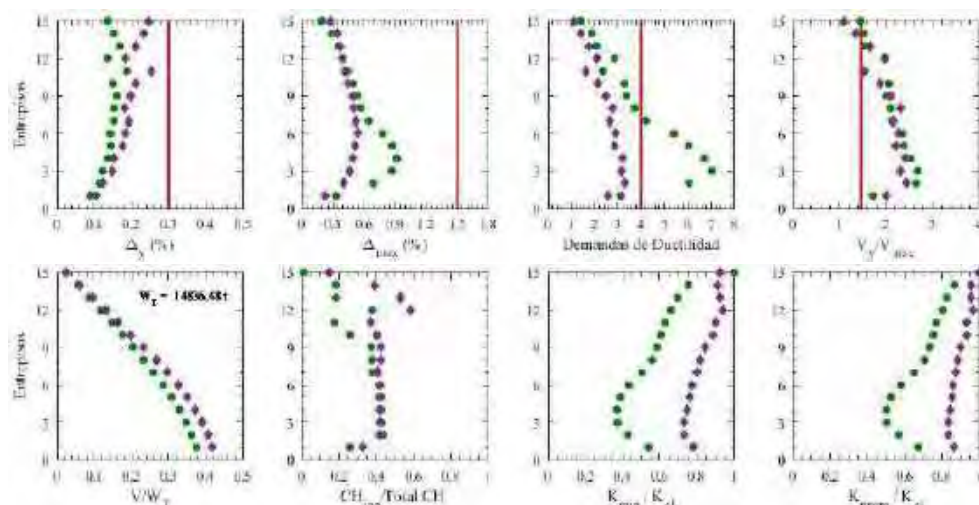


Figura G.234. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración MI15-B

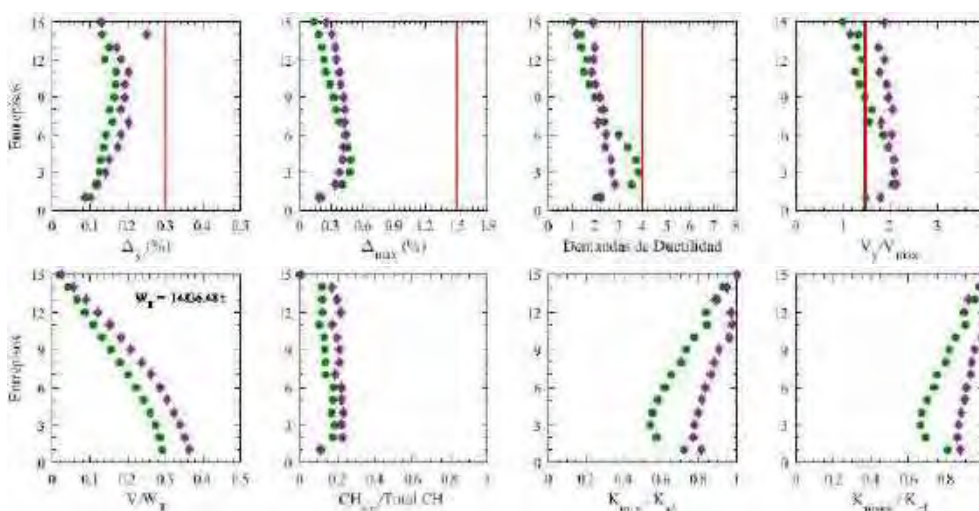


Figura G.235. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CU80-A (2017)

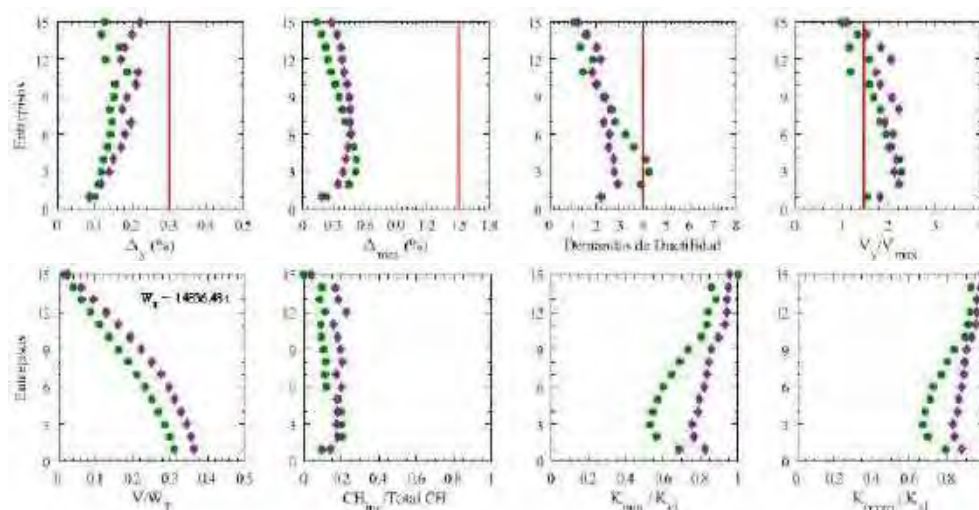


Figura G.236. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración CU80-B (2017)

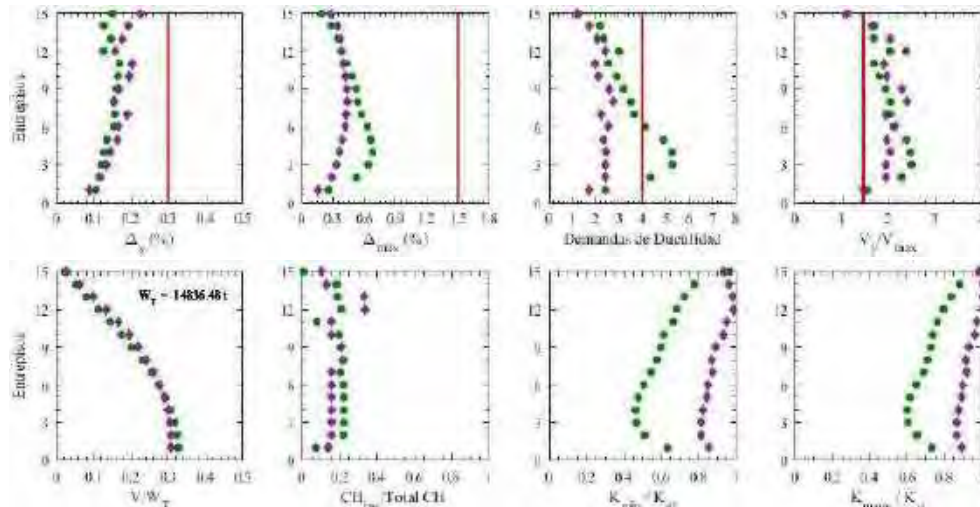


Figura G.237. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DX37-A (2017)

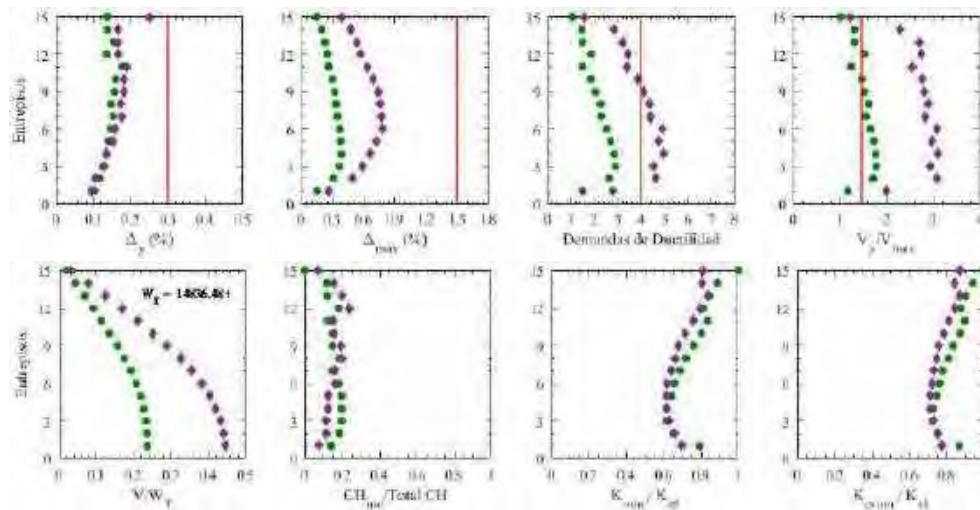


Figura G.238. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración DX37-B (2017)

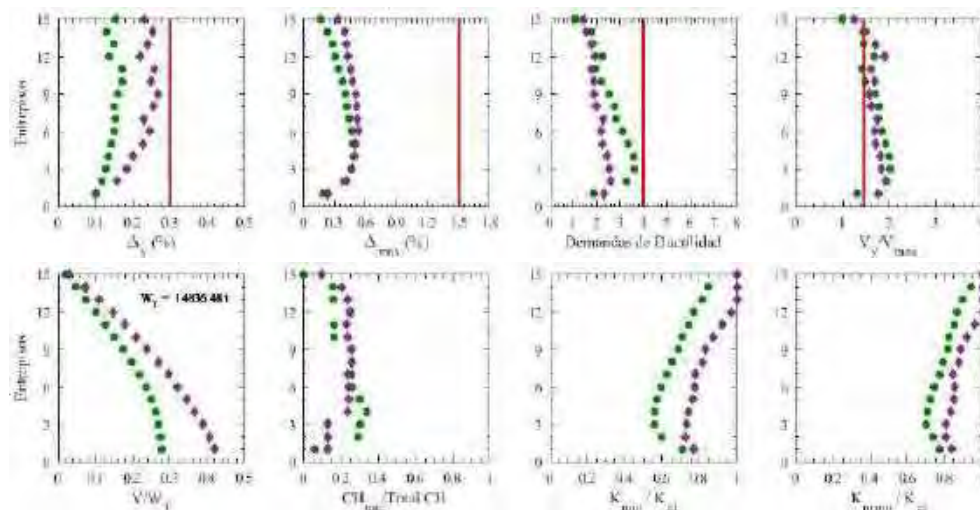


Figura G.239. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración JC54-A (2017)

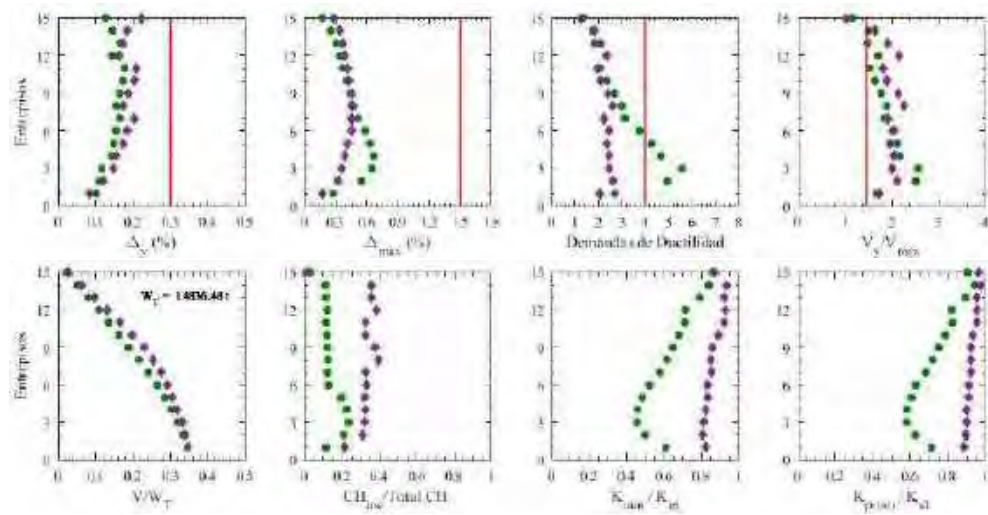


Figura G.240. Resumen de la respuesta global, registros de aceleración JC54-B (2017)

G.2.8 Distorsiones Residuales

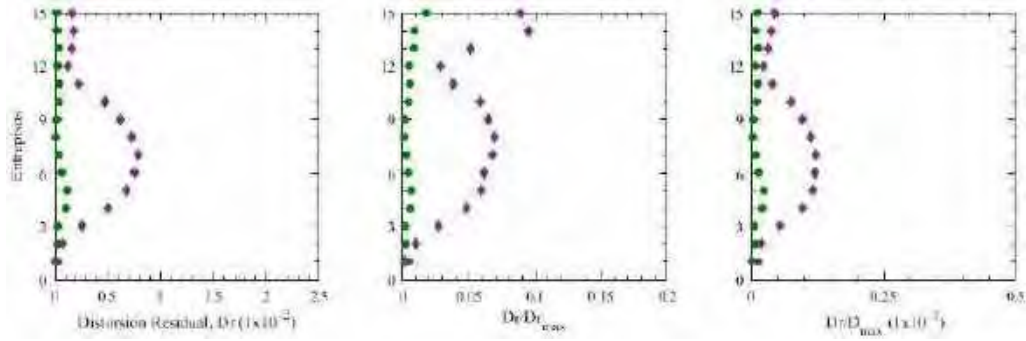


Figura G.241. Distorsiones Residuales, registros de aceleración CM-A

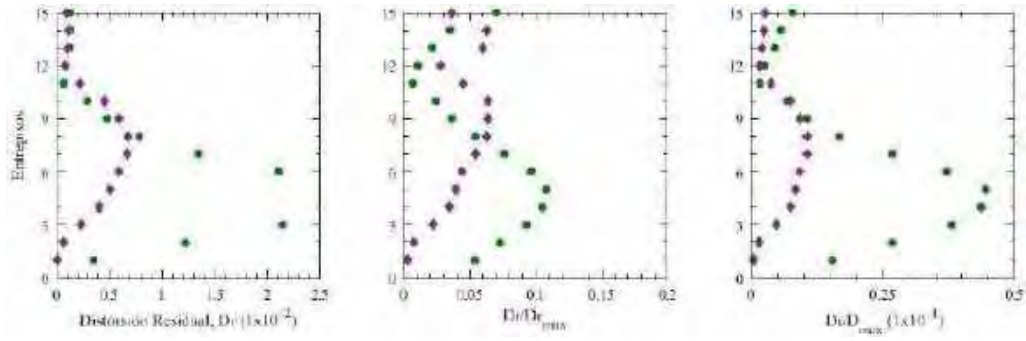


Figura G.242. Distorsiones Residuales, registros de aceleración CM-B

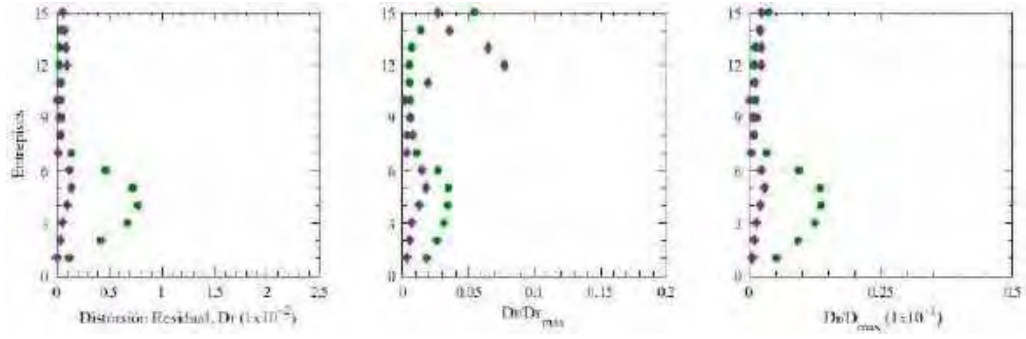


Figura G.243. Distorsiones Residuales, registros de aceleración DFRO-A

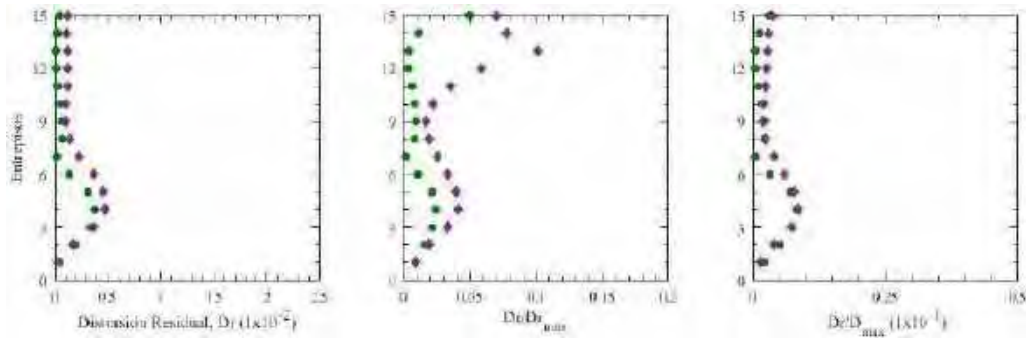


Figura G.244. Distorsiones Residuales, registros de aceleración DFRO-B

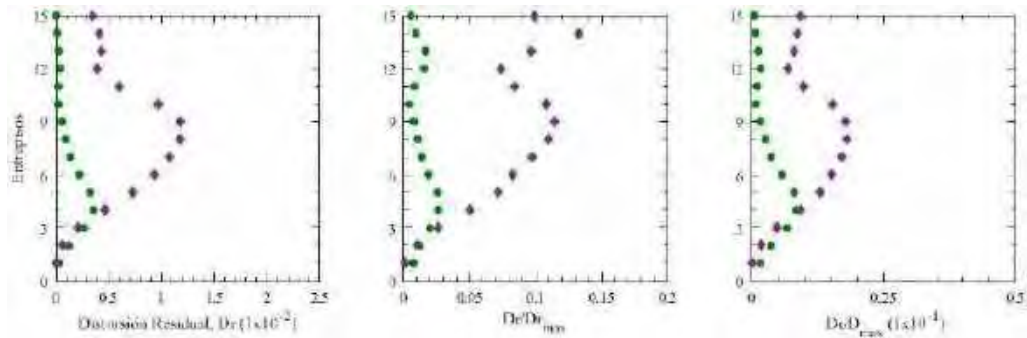


Figura G.245. Distorsiones Residuales, registros de aceleración IMSR-A

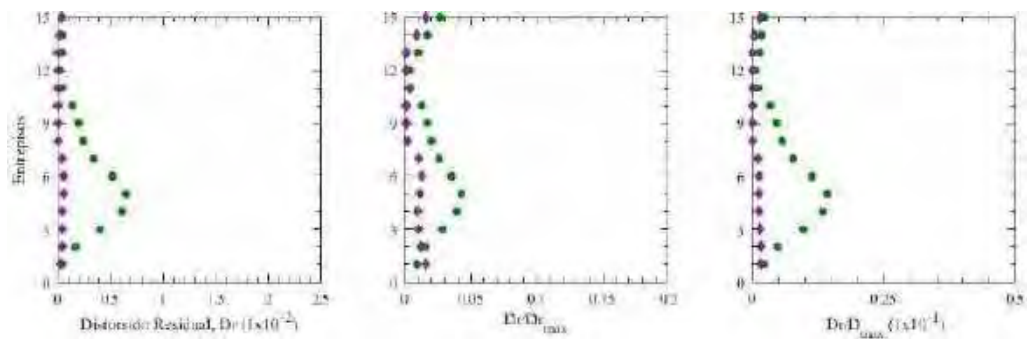


Figura G.246. Distorsiones Residuales, registros de aceleración IMSR-B

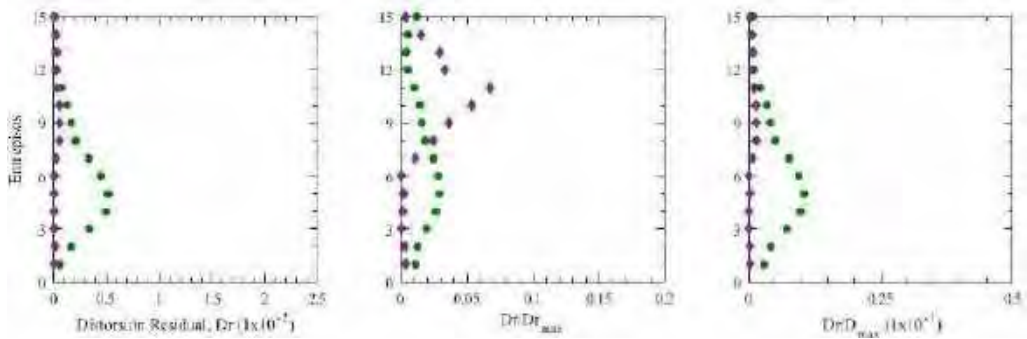


Figura G.247. Distorsiones Residuales, registros de aceleración SMR-A

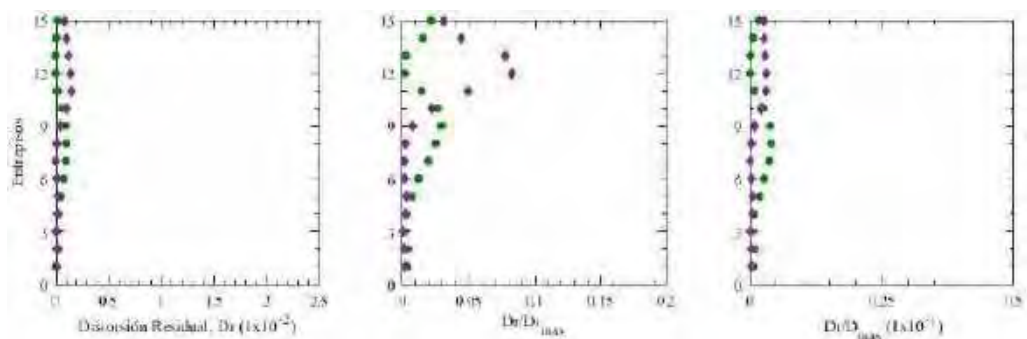


Figura G.248. Distorsiones Residuales, registros de aceleración SMR-B

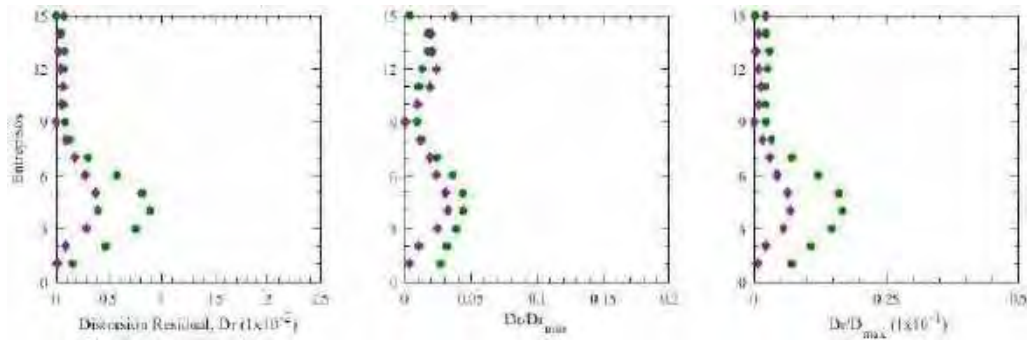


Figura G.249. Distorsiones Residuales, registros de aceleración MI15-A

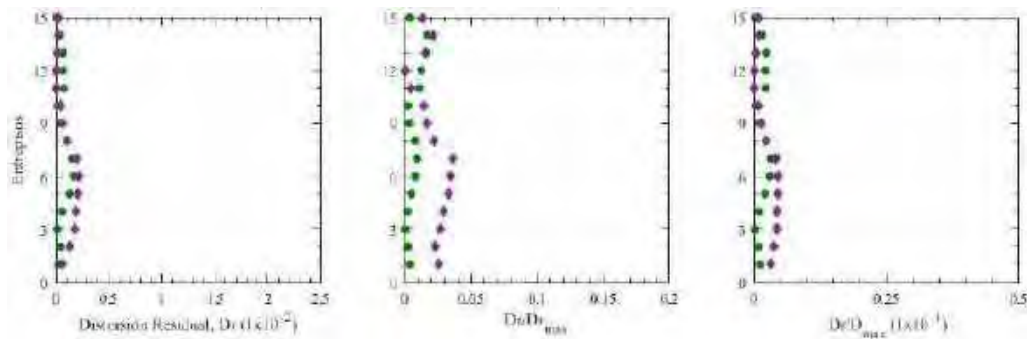


Figura G.250. Distorsiones Residuales, registros de aceleración MI15-B

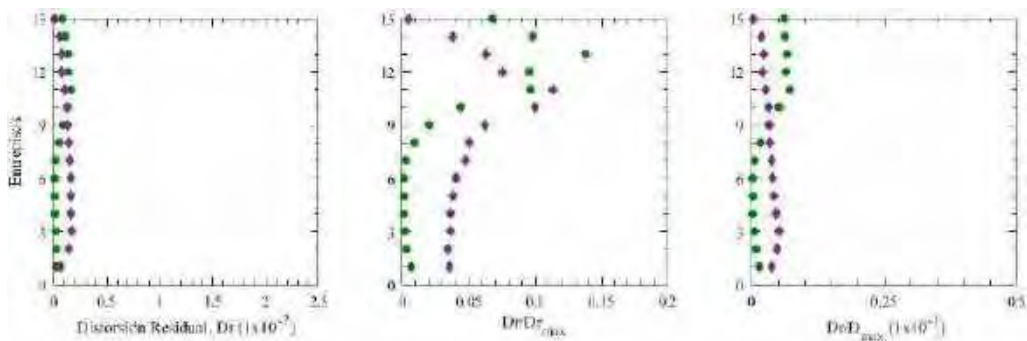


Figura G.251. Distorsiones Residuales, registros de aceleración CU80-A (2017)

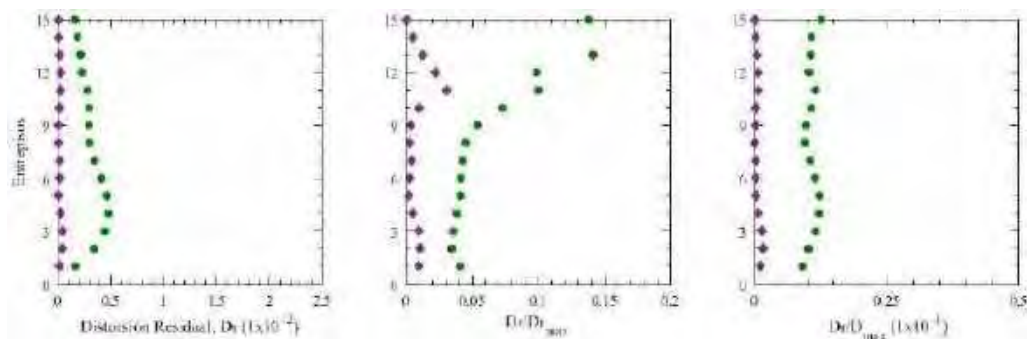


Figura G.252. Distorsiones Residuales, registros de aceleración CU80-B (2017)

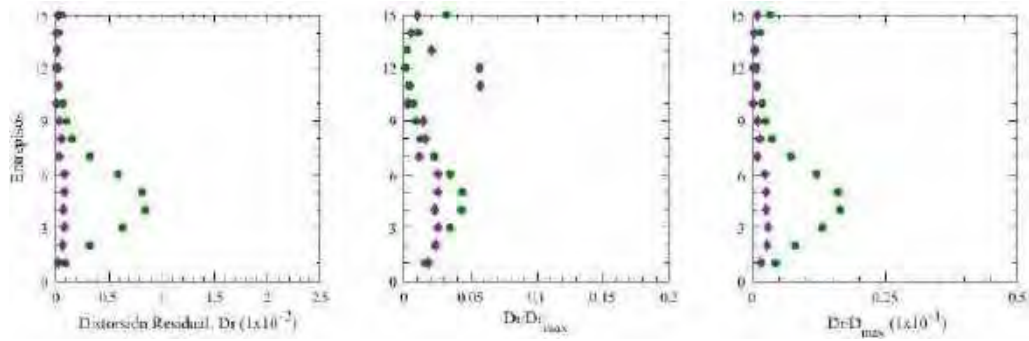


Figura G.253. Distorsiones Residuales, registros de aceleración DX37-A (2017)

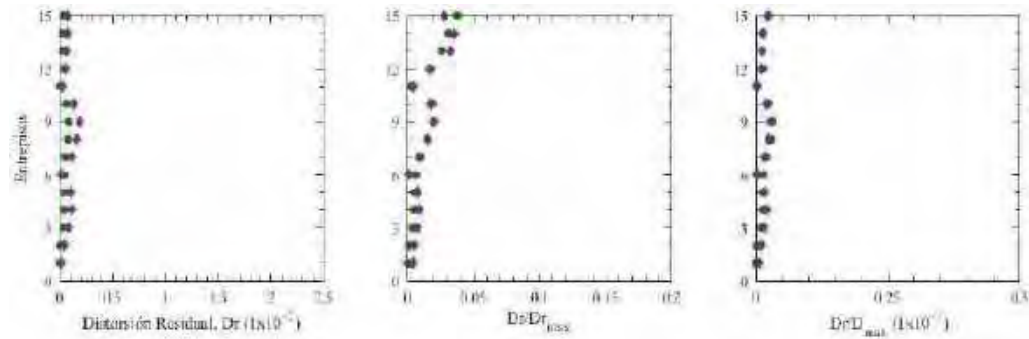


Figura G.254. Distorsiones Residuales, registros de aceleración DX37-B (2017)

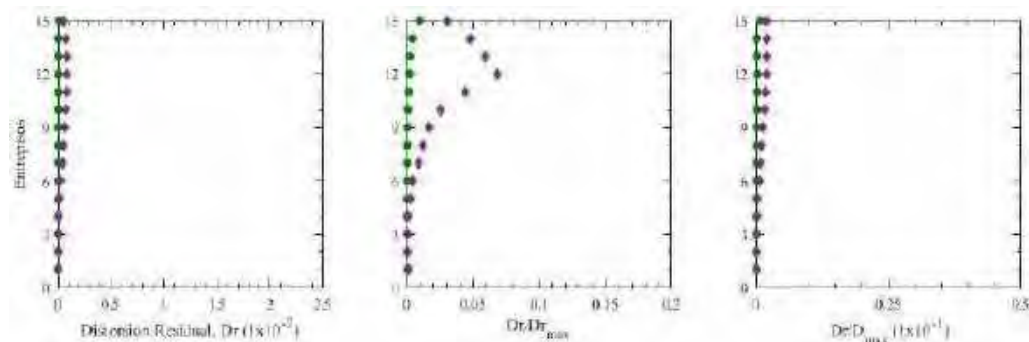


Figura G.255. Distorsiones Residuales, registros de aceleración JC54-A (2017)

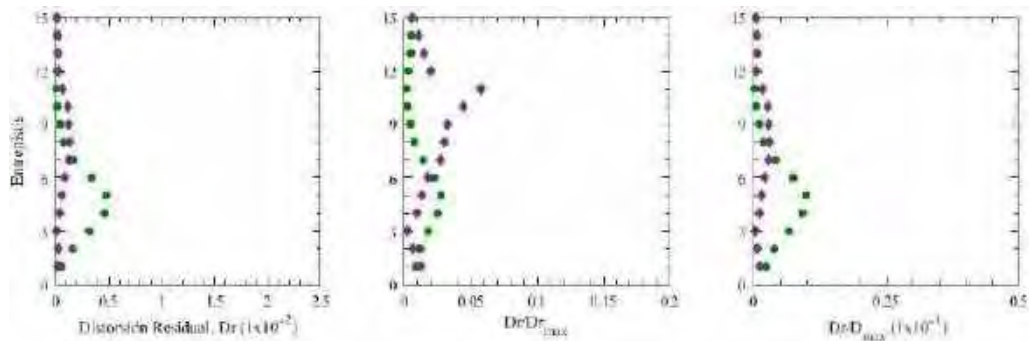


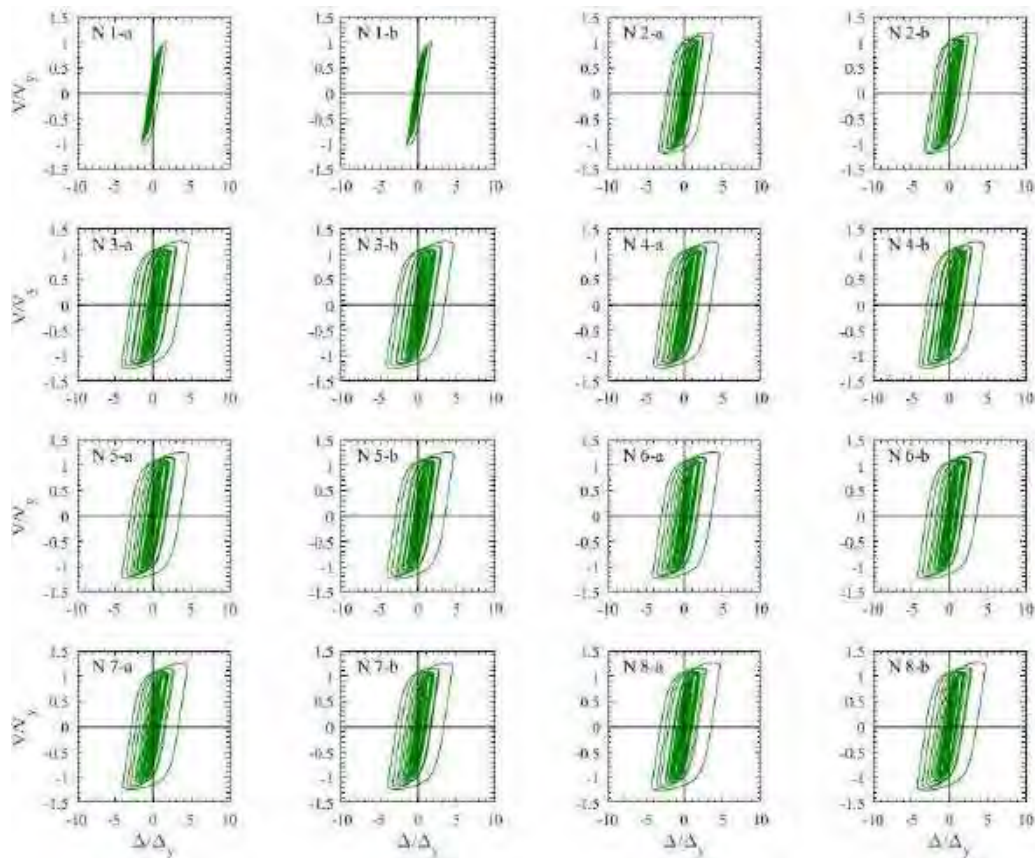
Figura G.256. Distorsiones Residuales, registros de aceleración JC54-B (2017)

18. Apéndice H. Resultados para edificio de 24 entrepisos con análisis dinámicos paso a paso no lineales

A continuación se presentan todos los resultados generados por los ocho pares de registros de aceleración, representativos de la zona IIIb, inducidos de manera simultánea a los edificios con 24 entrepisos; se presentan aquéllos considerando su base como rígida, así como también los obtenidos tomando en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura.

H.1 Base Rígida

H.1.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS



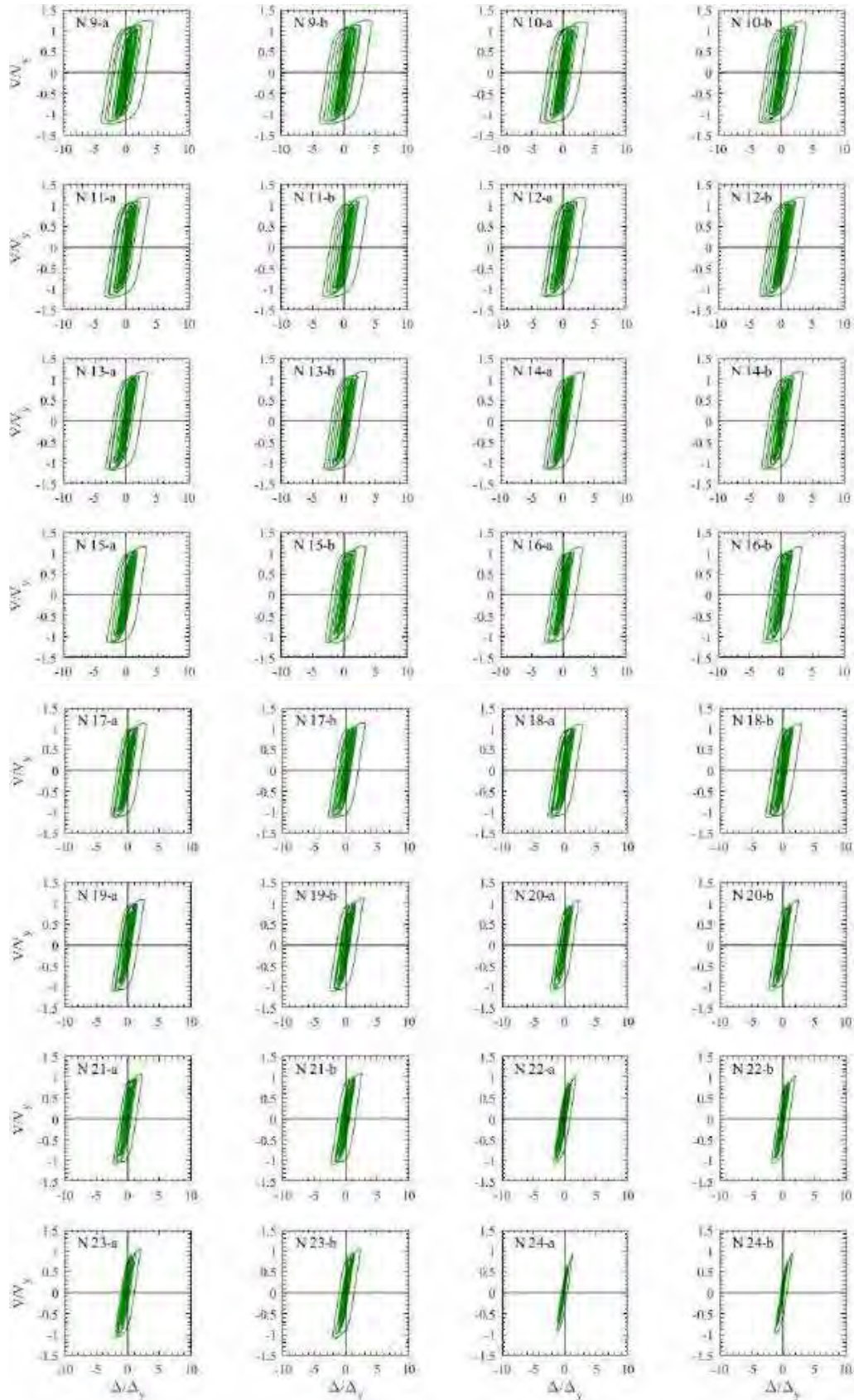
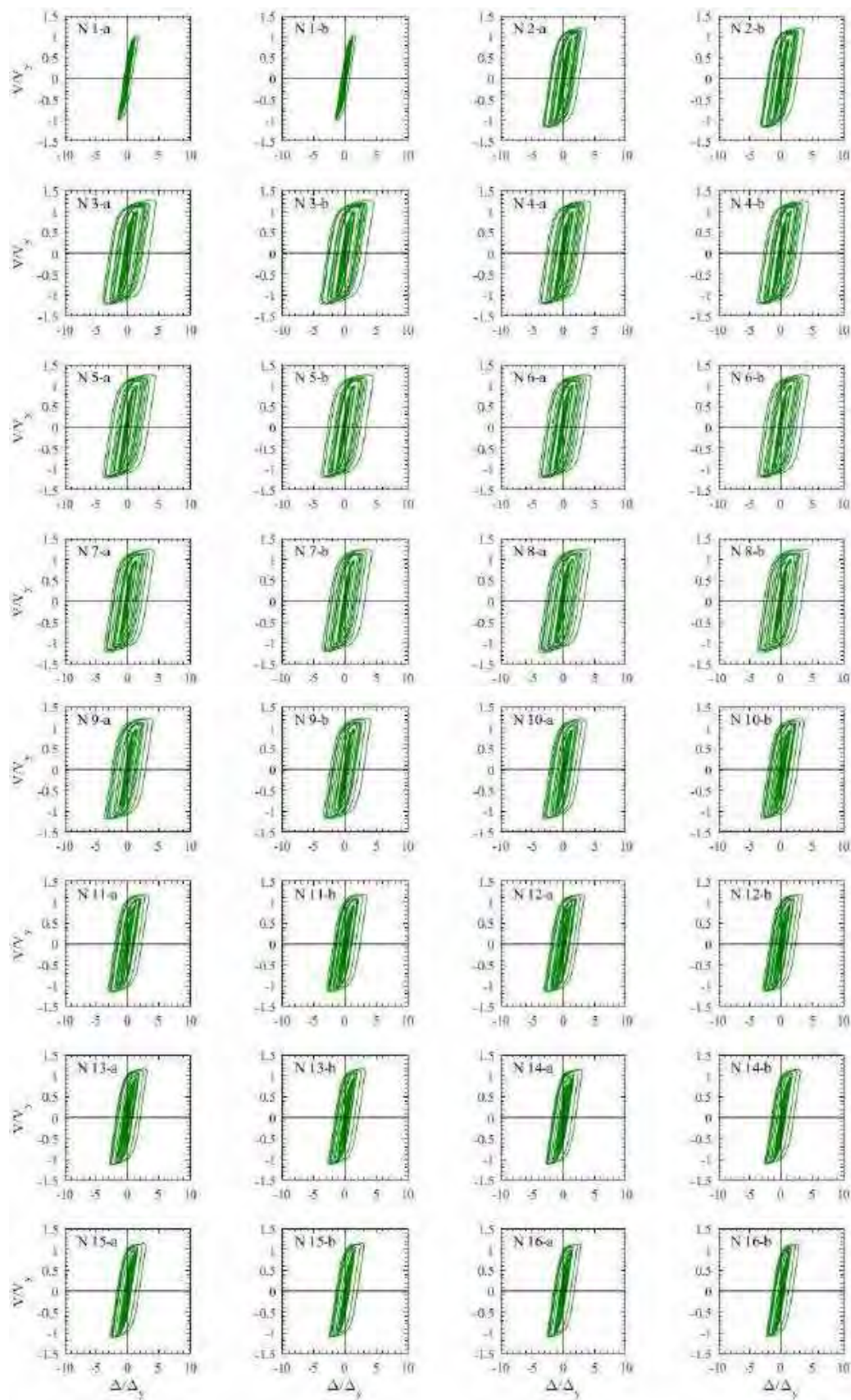


Figura H.1. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración TL08-A



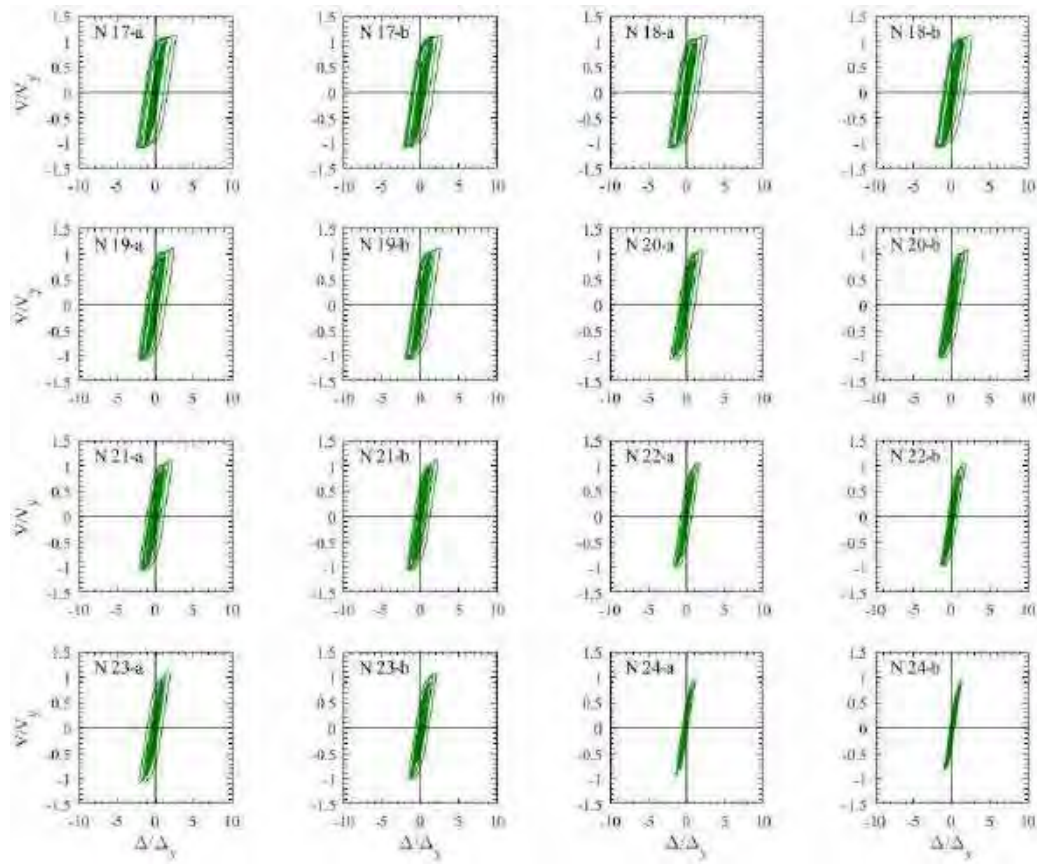
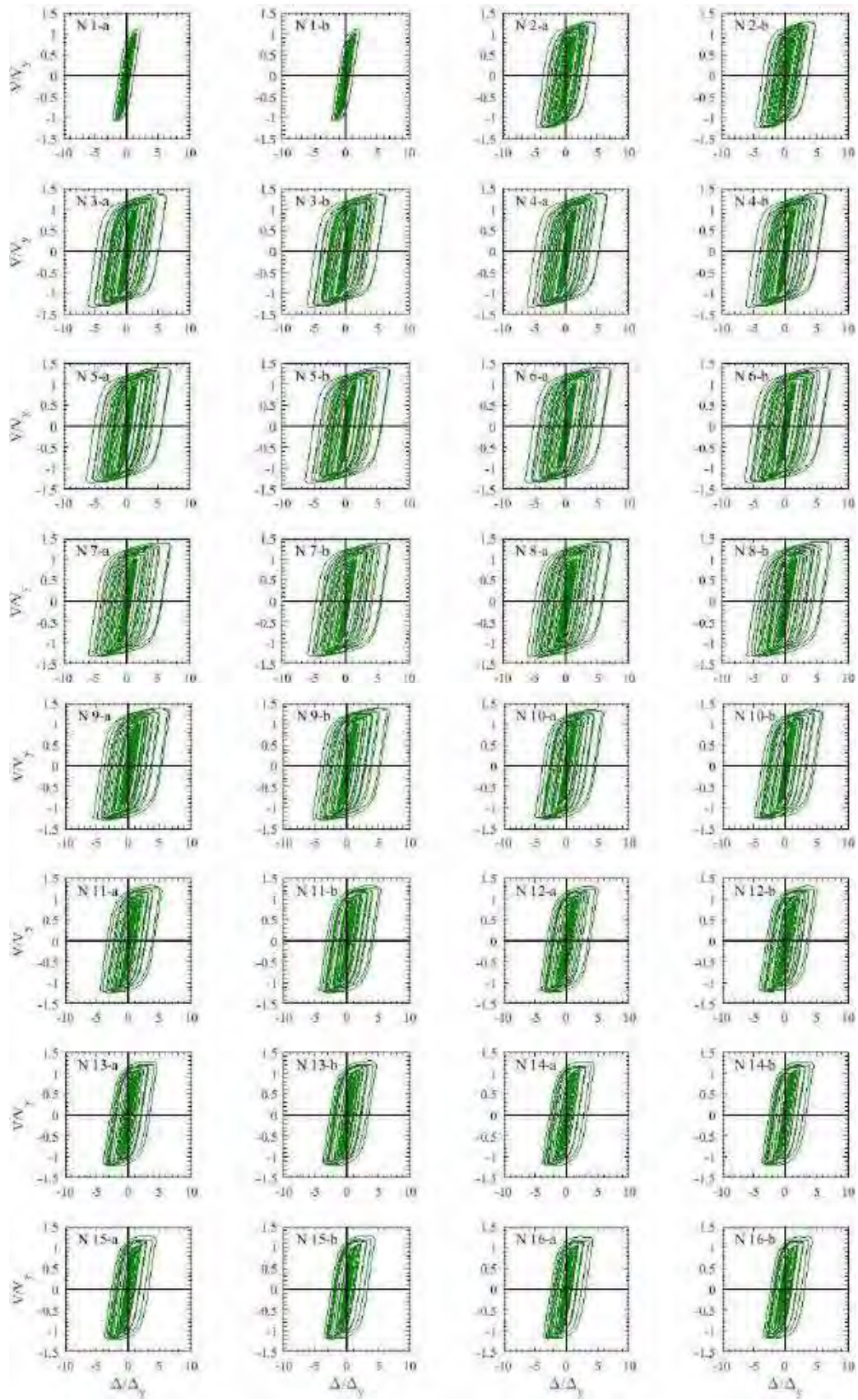


Figura H.2. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración TL08-B



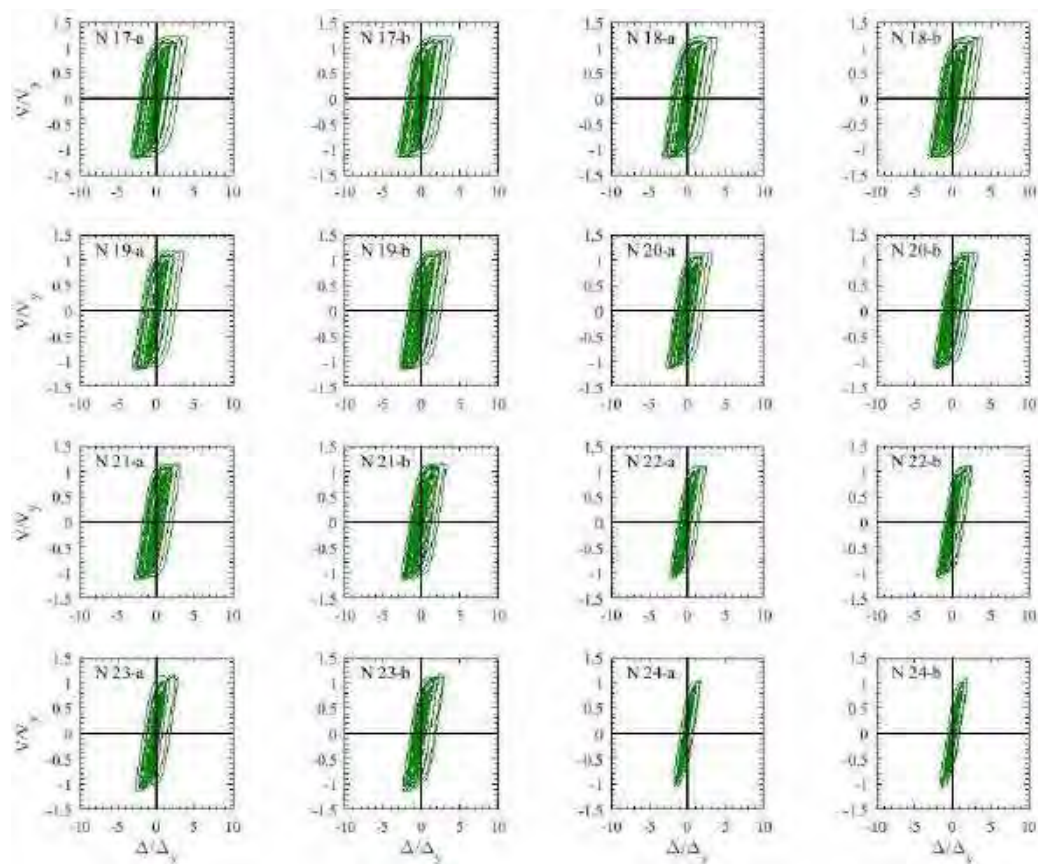
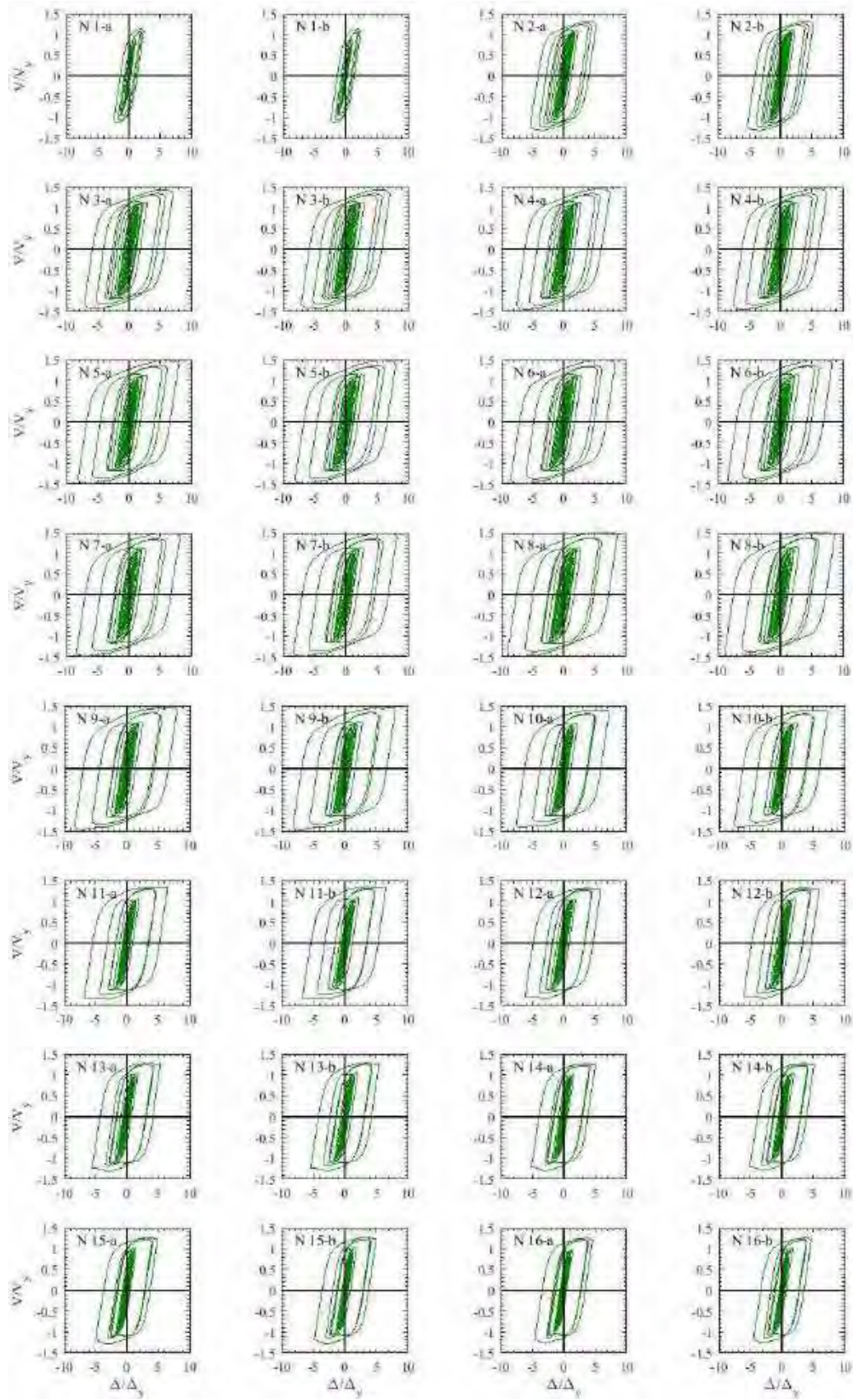


Figura H.3. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CJ03-A



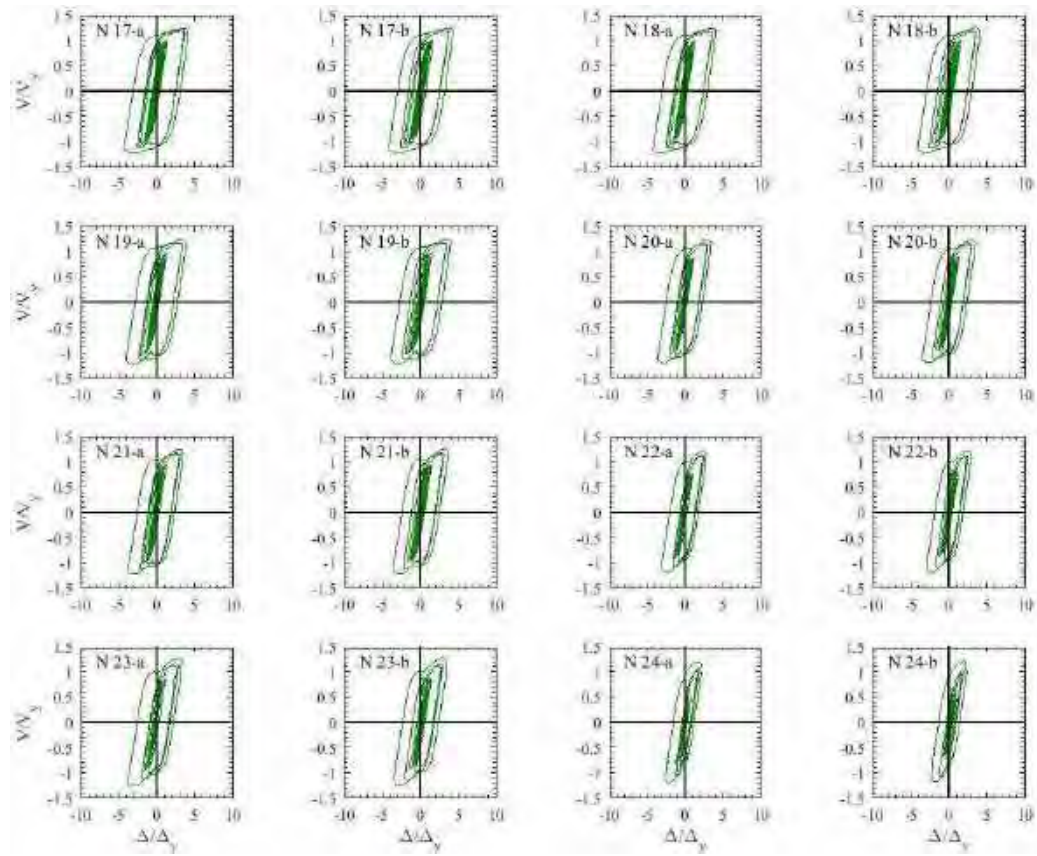
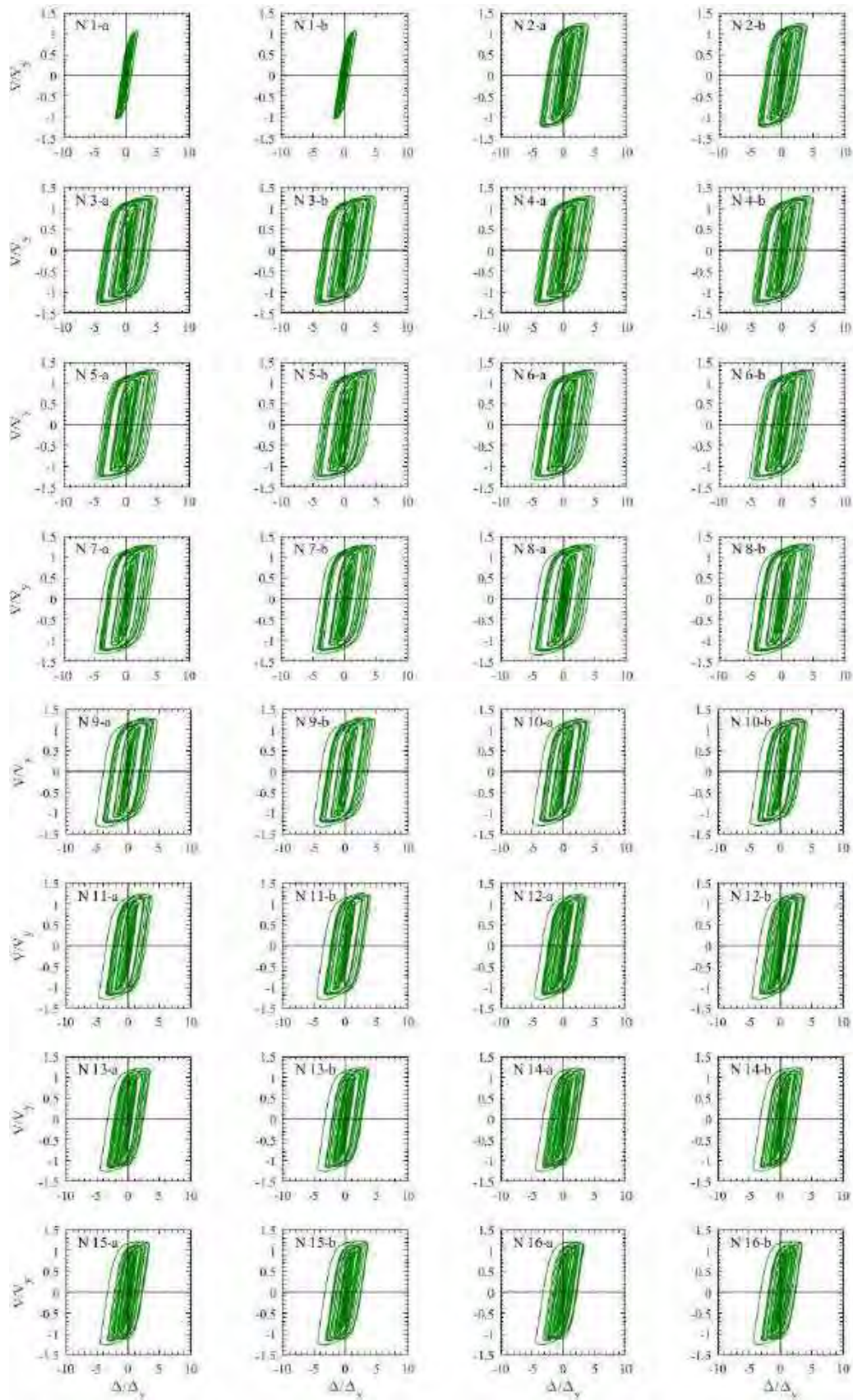


Figura H.4. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CJ03-B



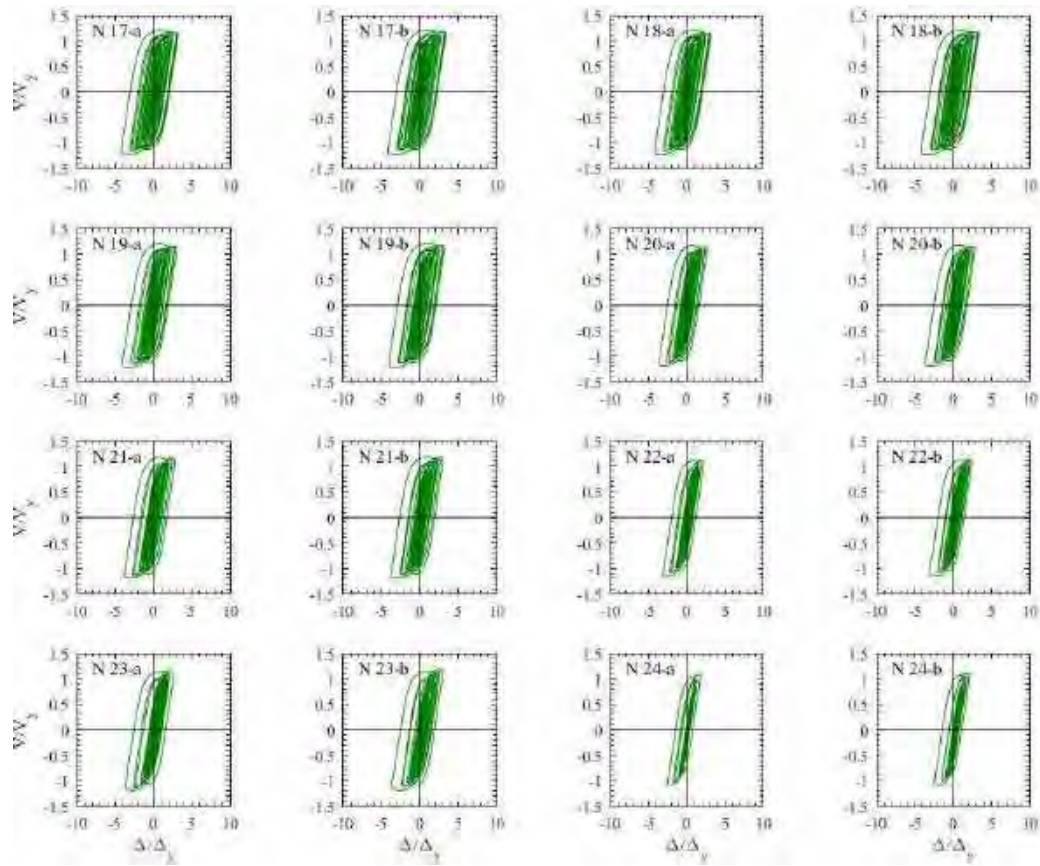
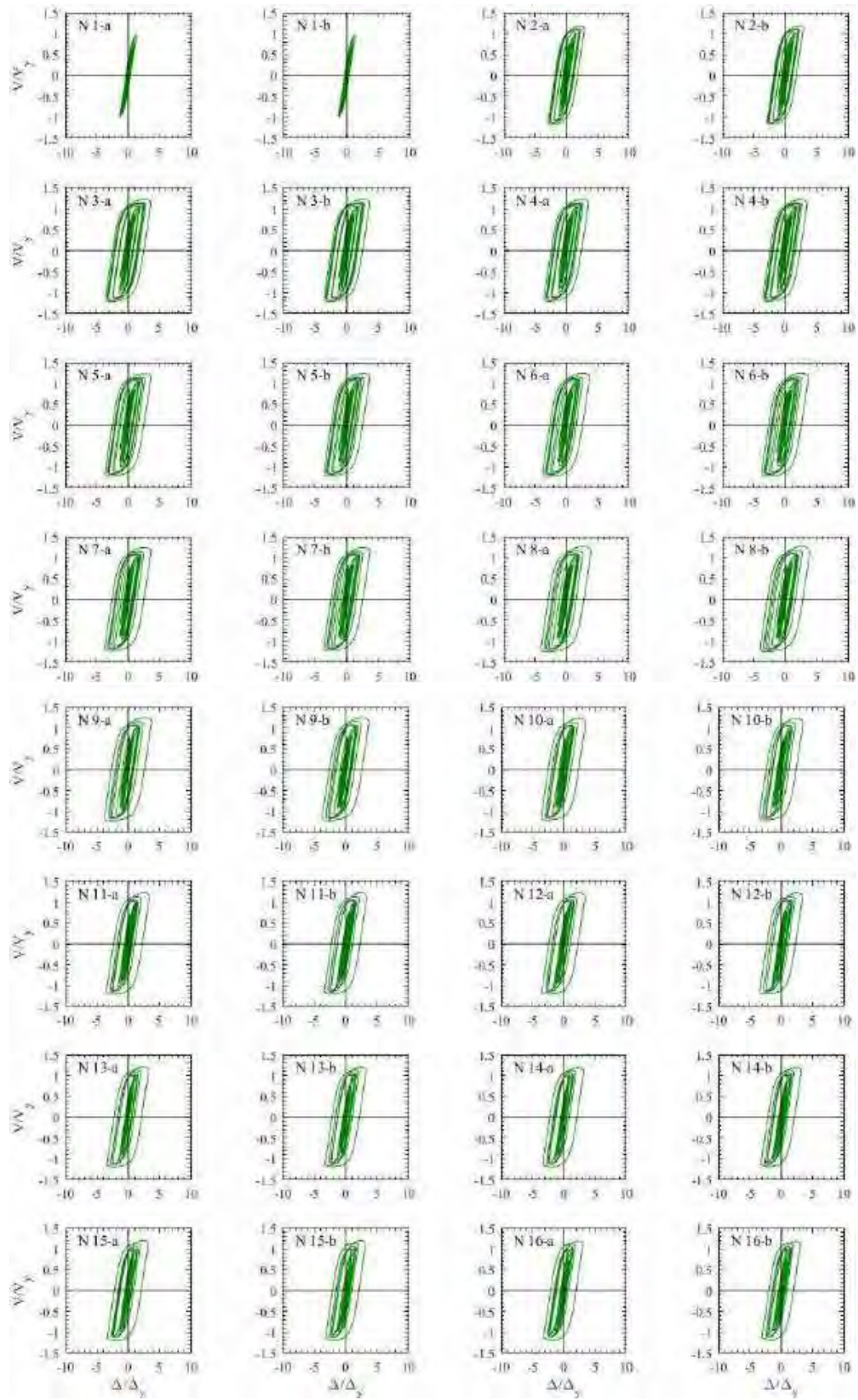


Figura H.5. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración ALAM85-A



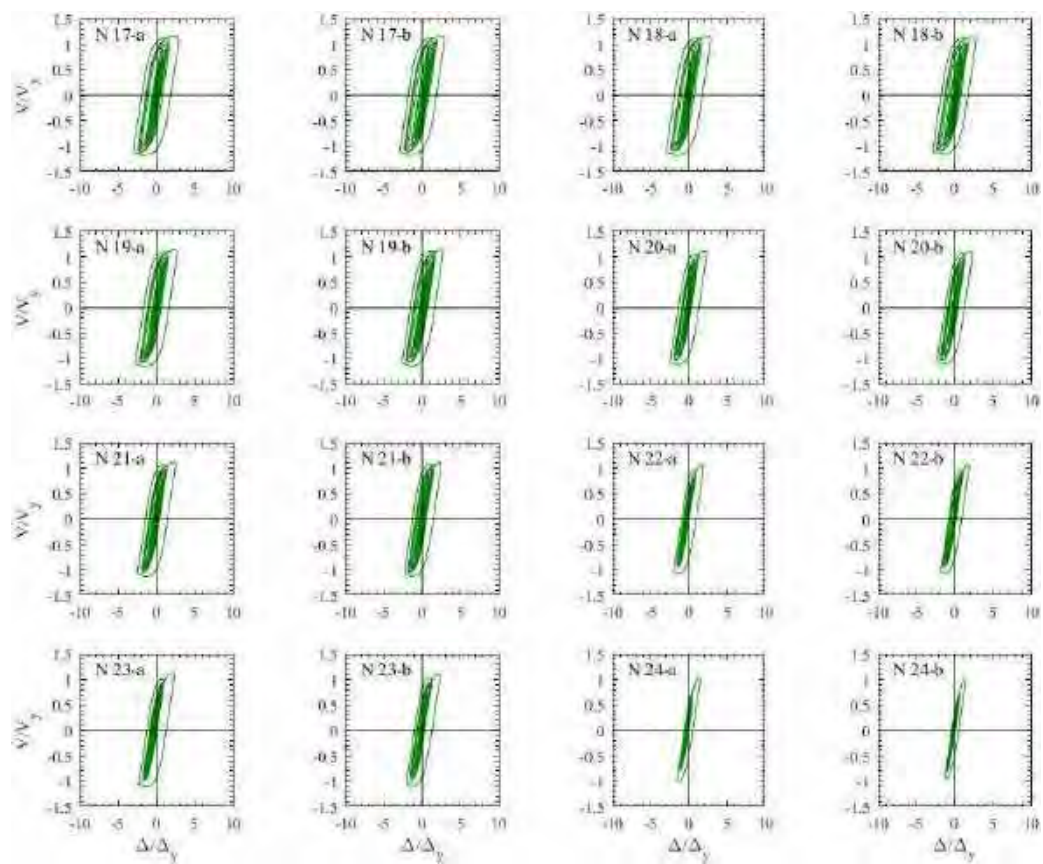
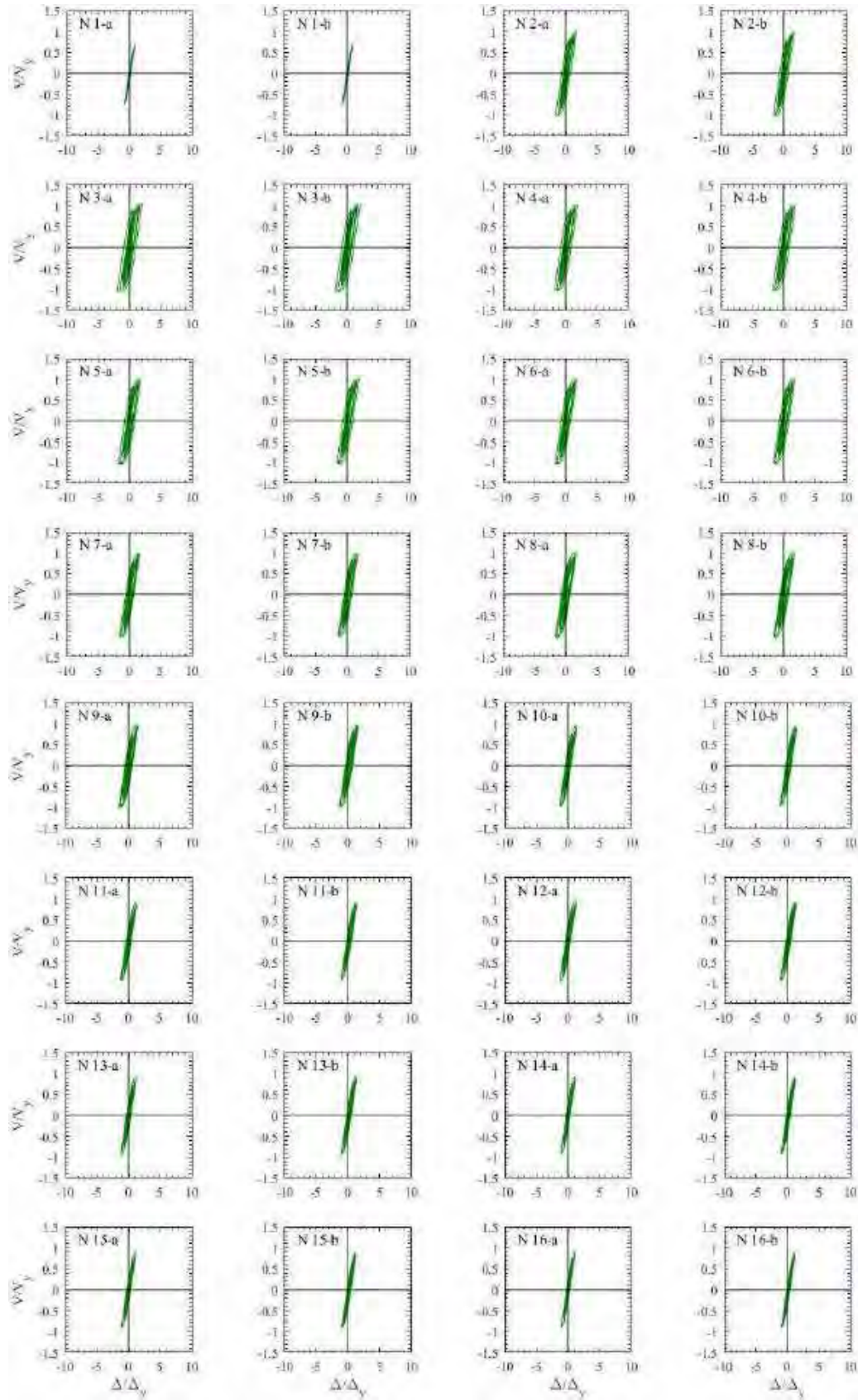


Figura H.6. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración ALAM85-B



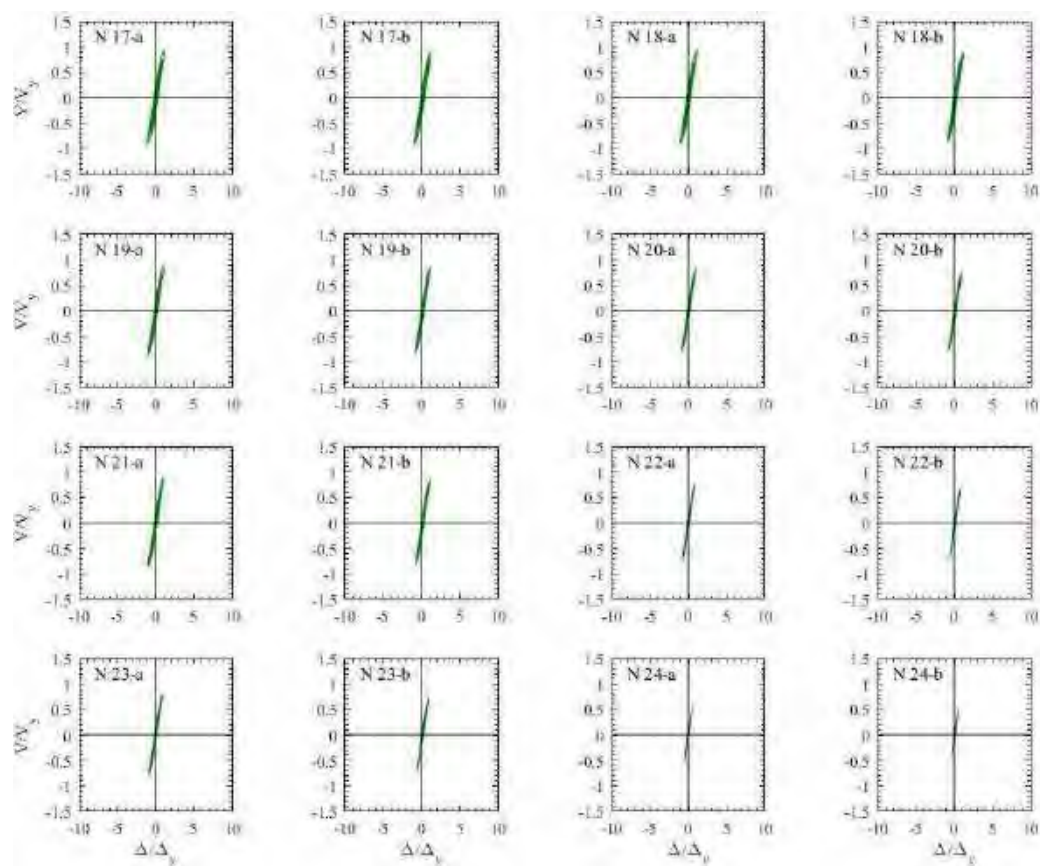
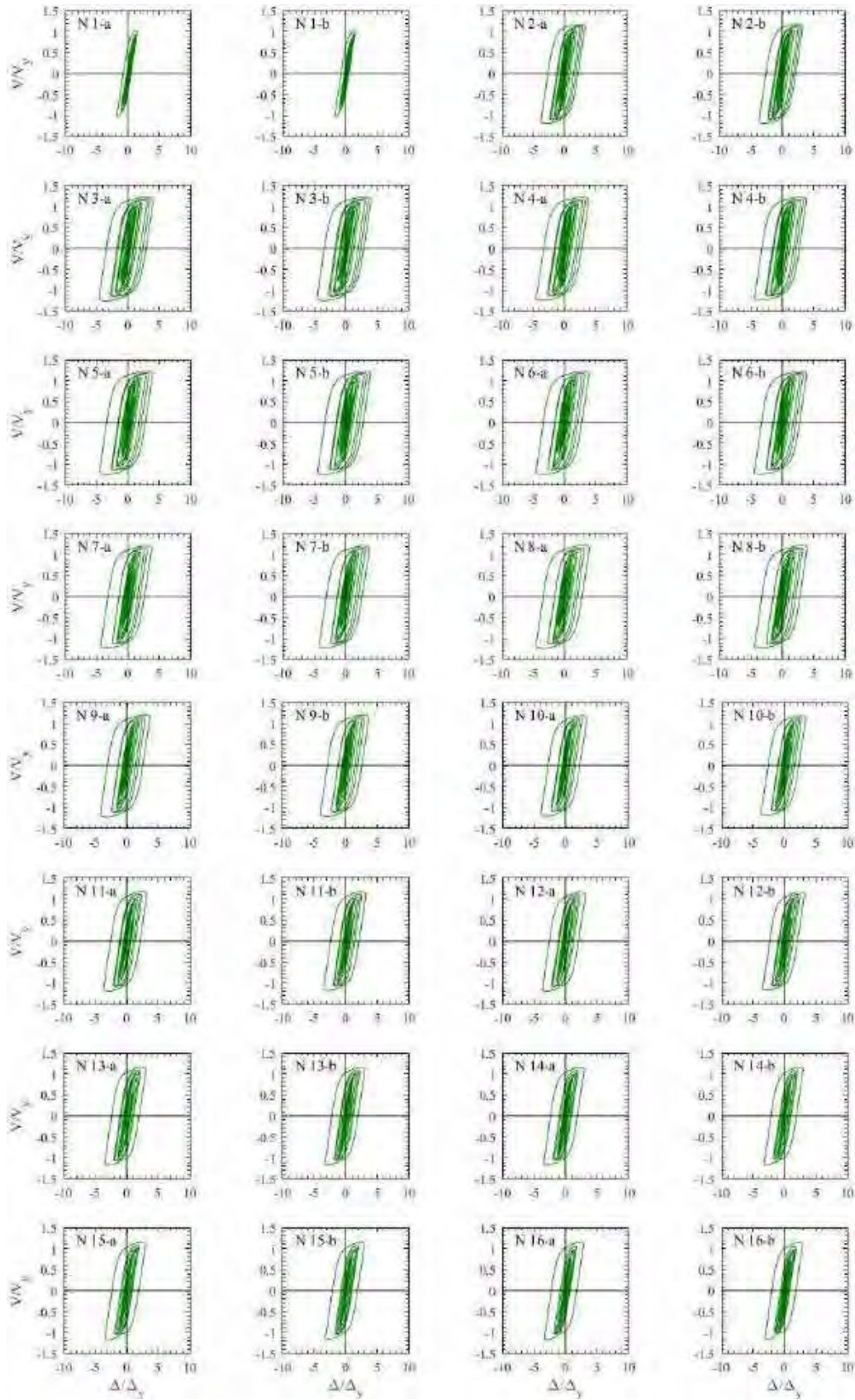


Figura H.7. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración TBOM-A (1985)



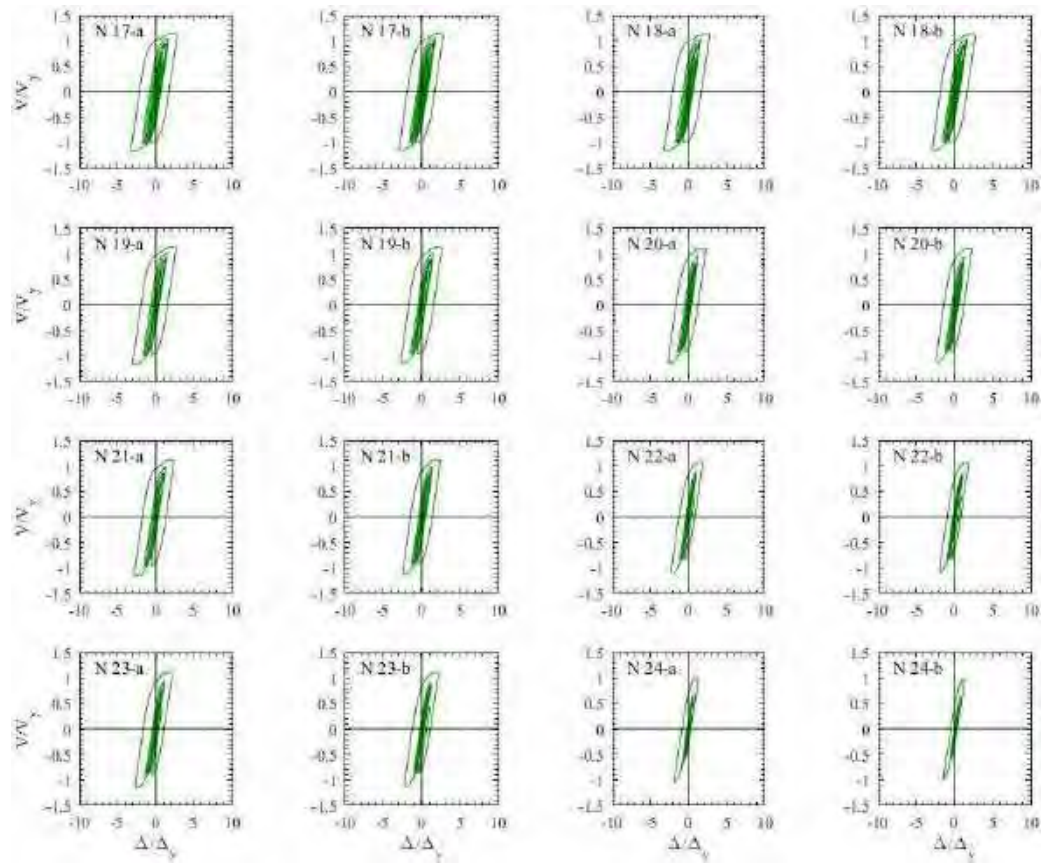
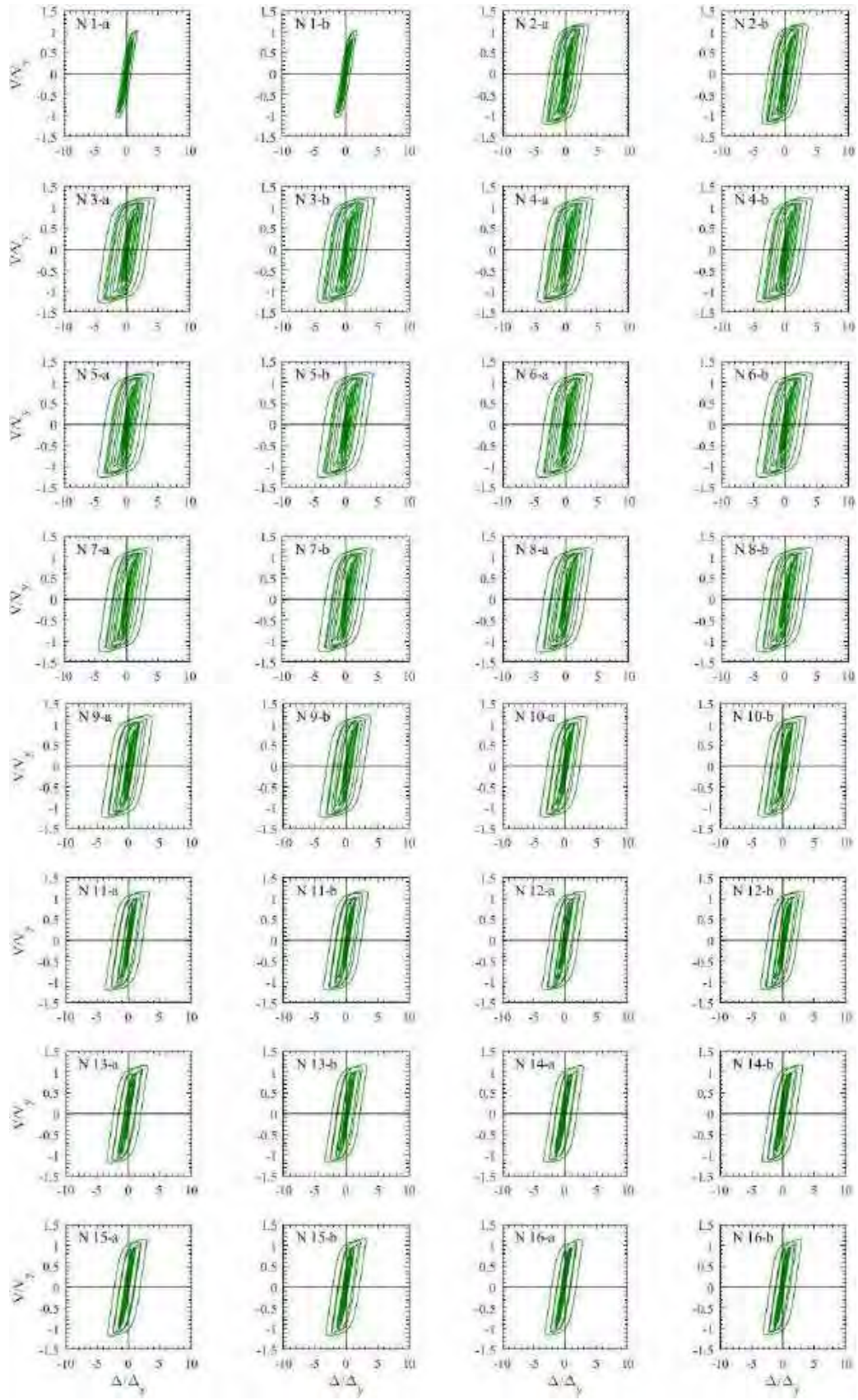


Figura H.8. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración TBOM –B (1985)



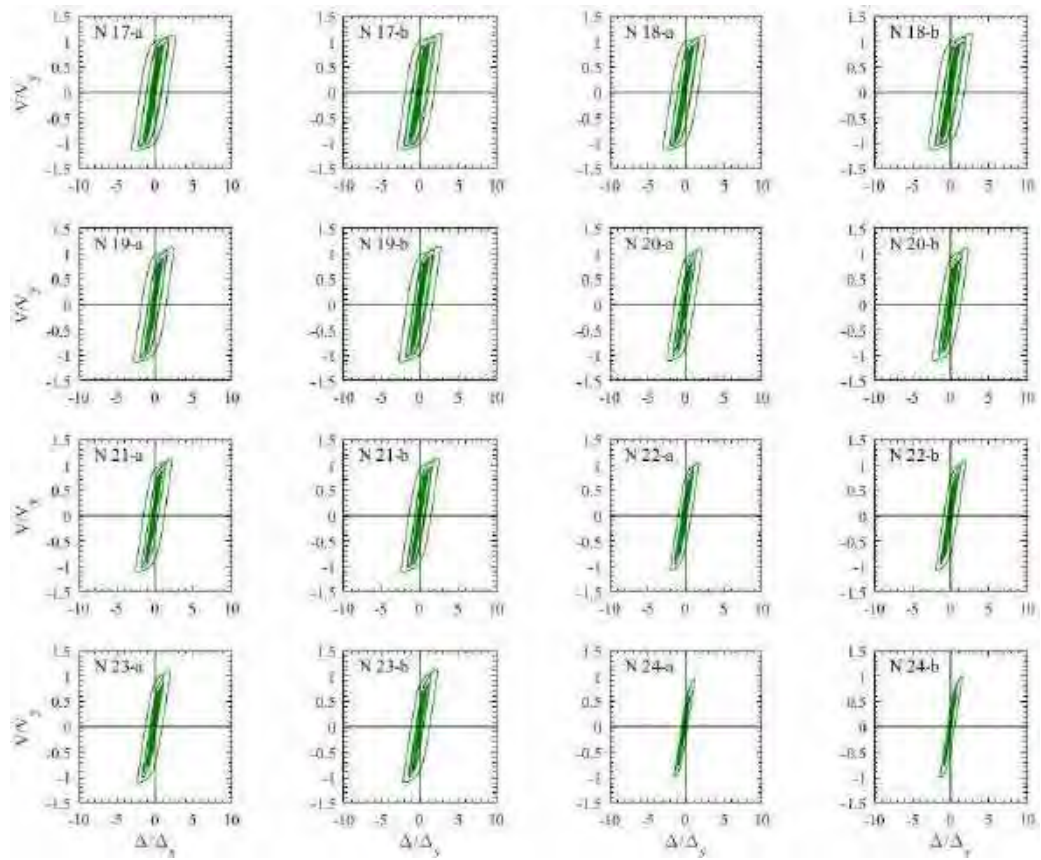
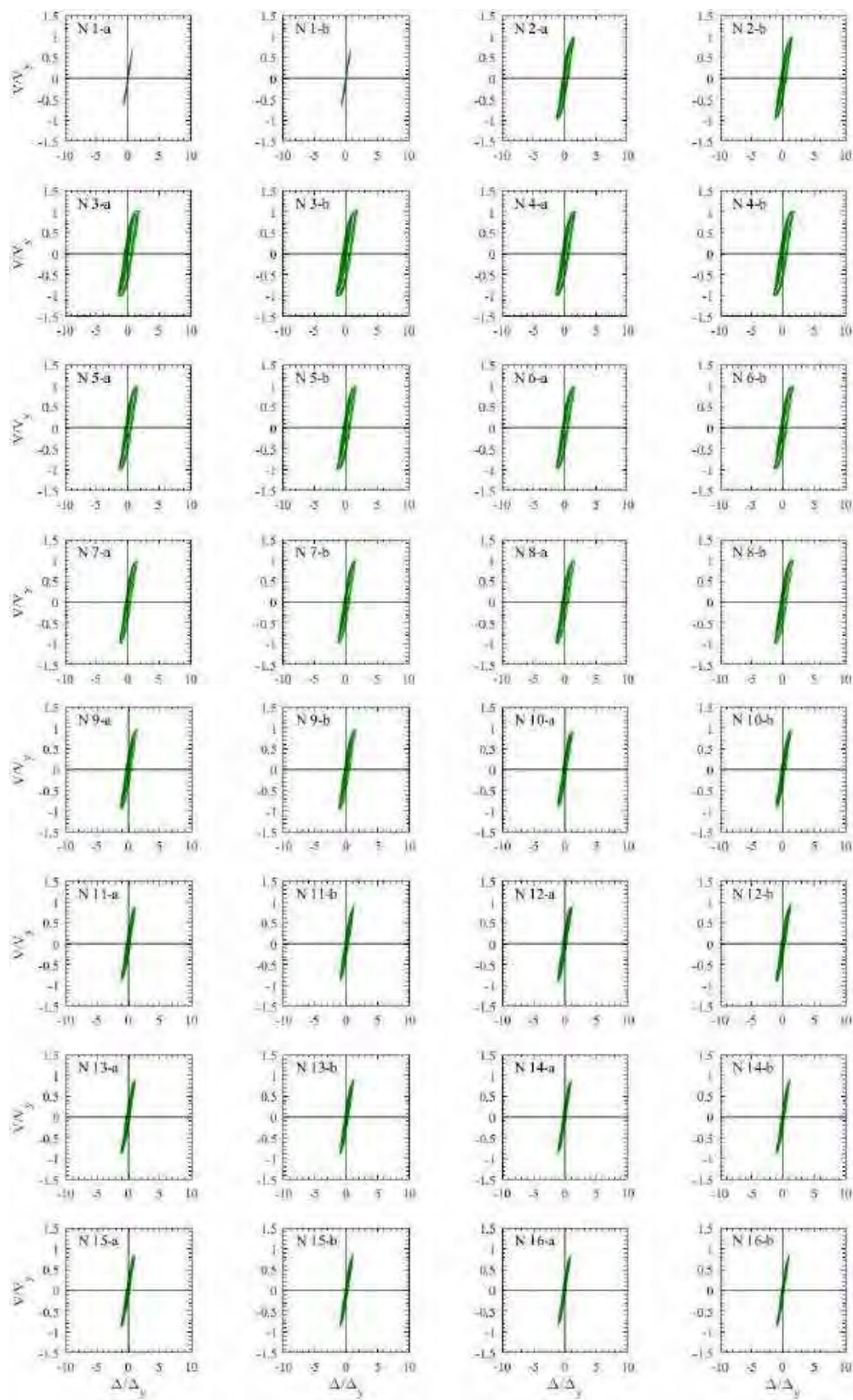


Figura H.9. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SCT185-A (1985)



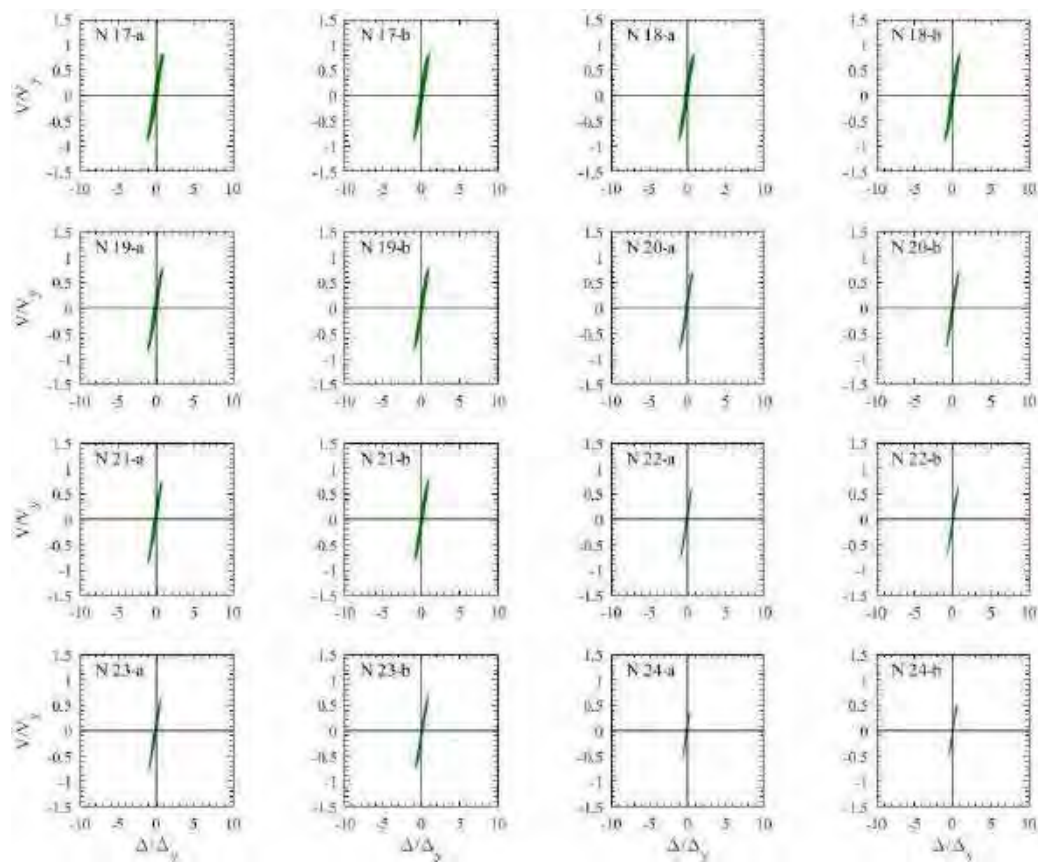
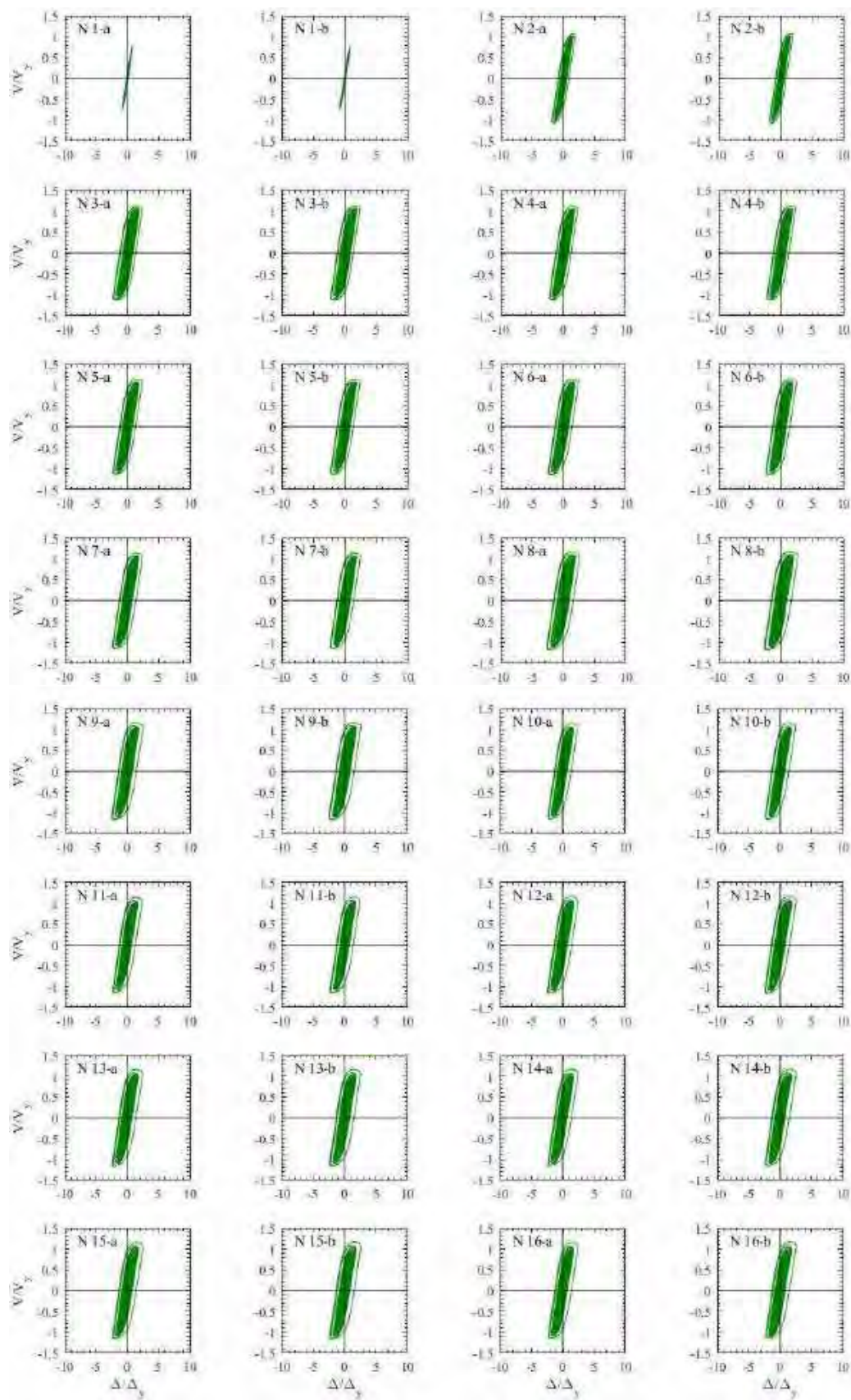


Figura H.10. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SCT185-B (1985)



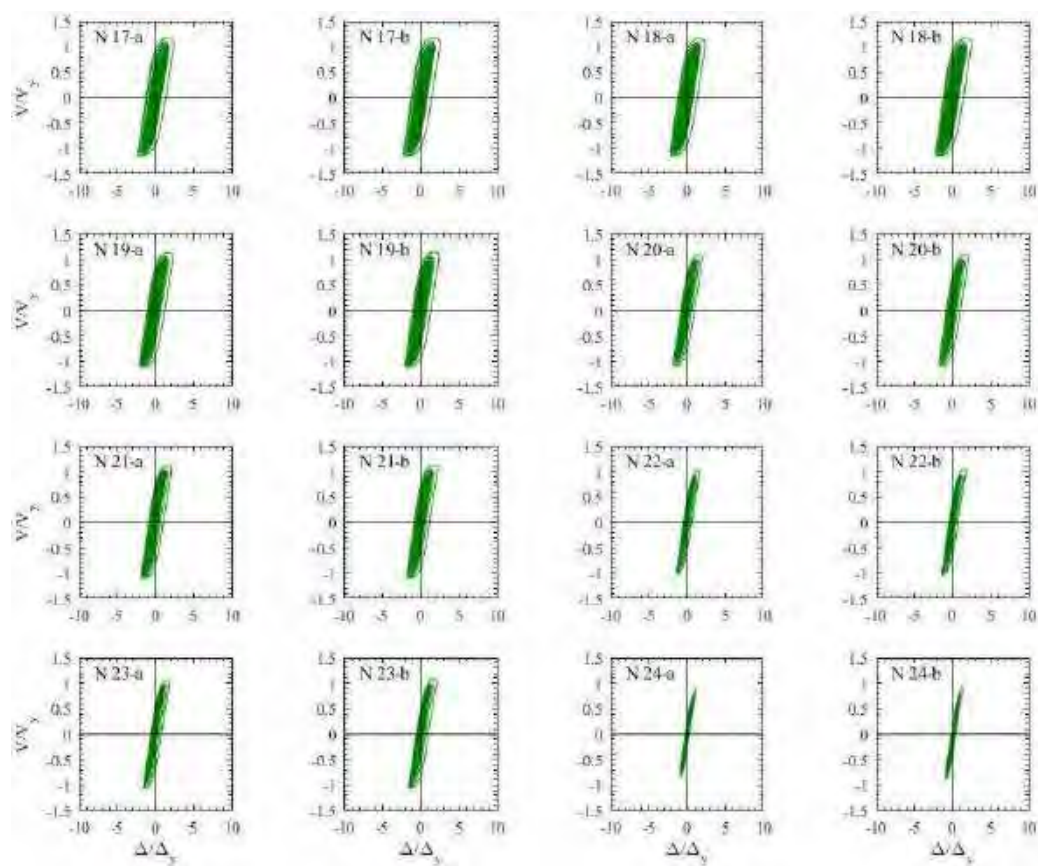
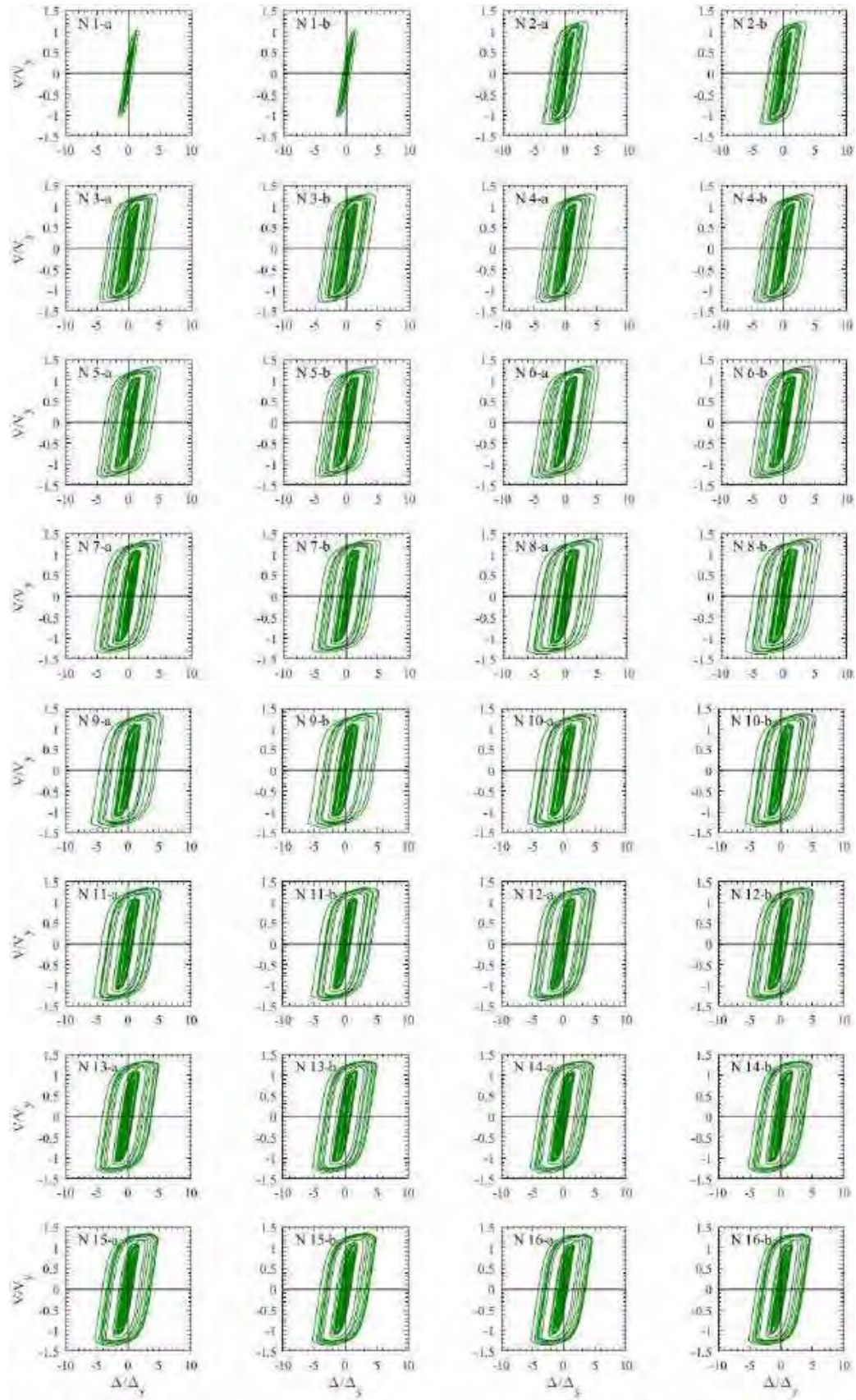


Figura H.11. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CH84-A (2017)



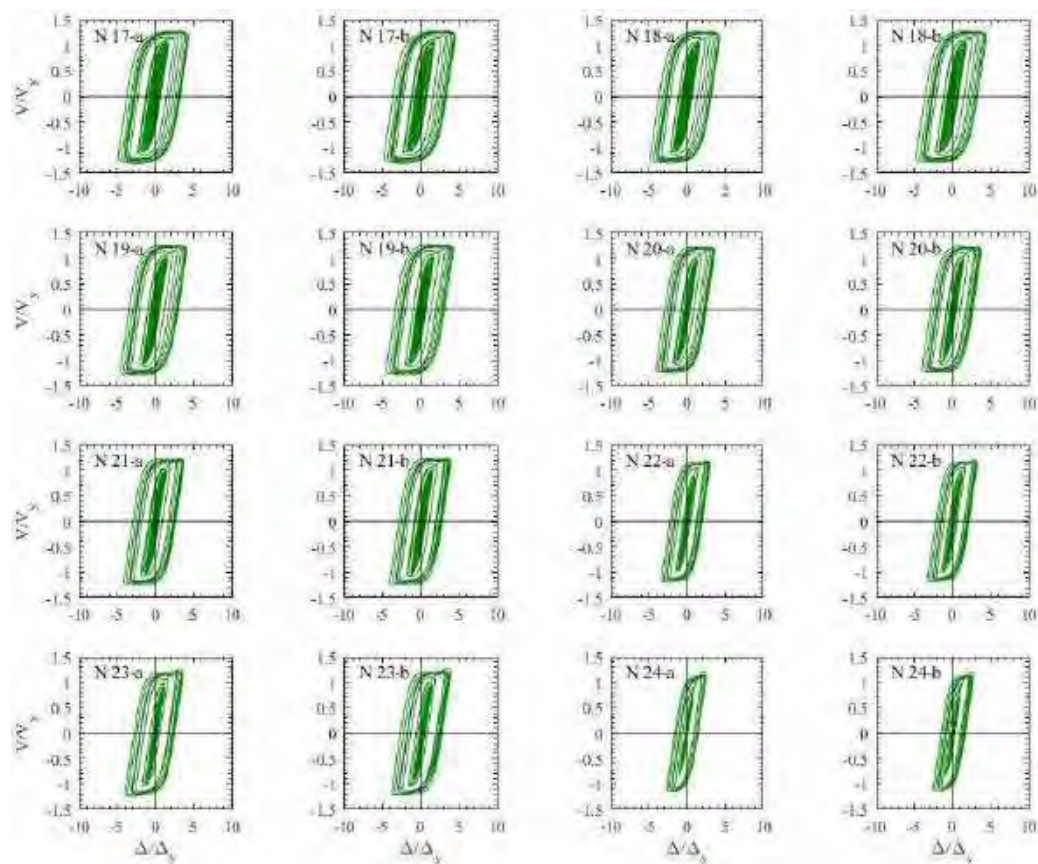
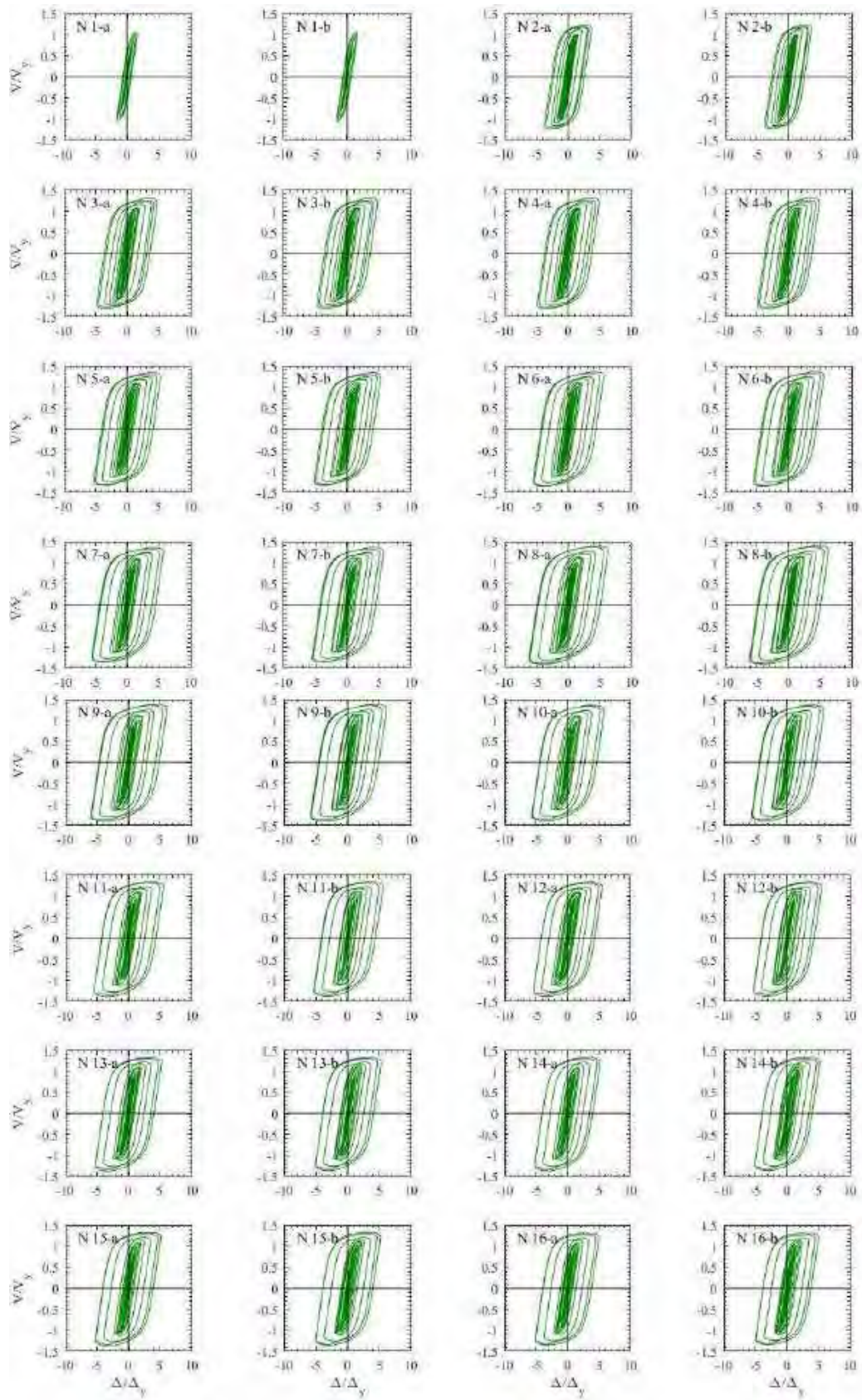


Figura H.12. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CH84-B (2017)



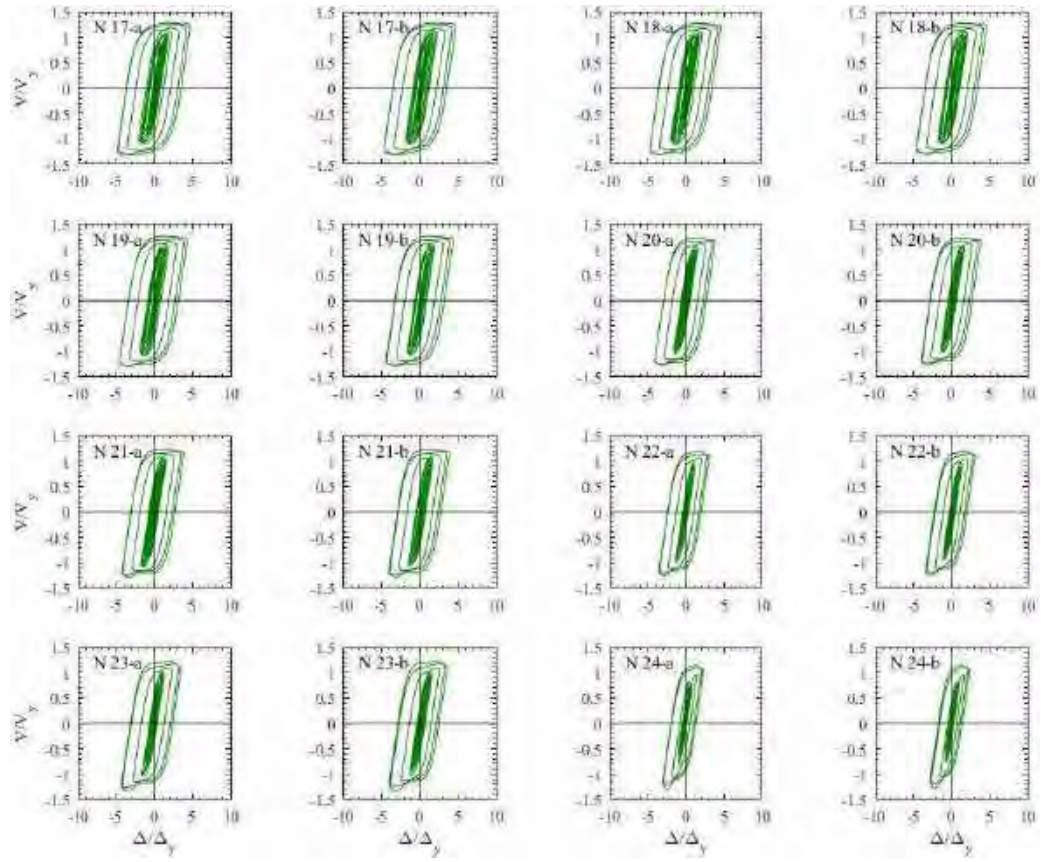
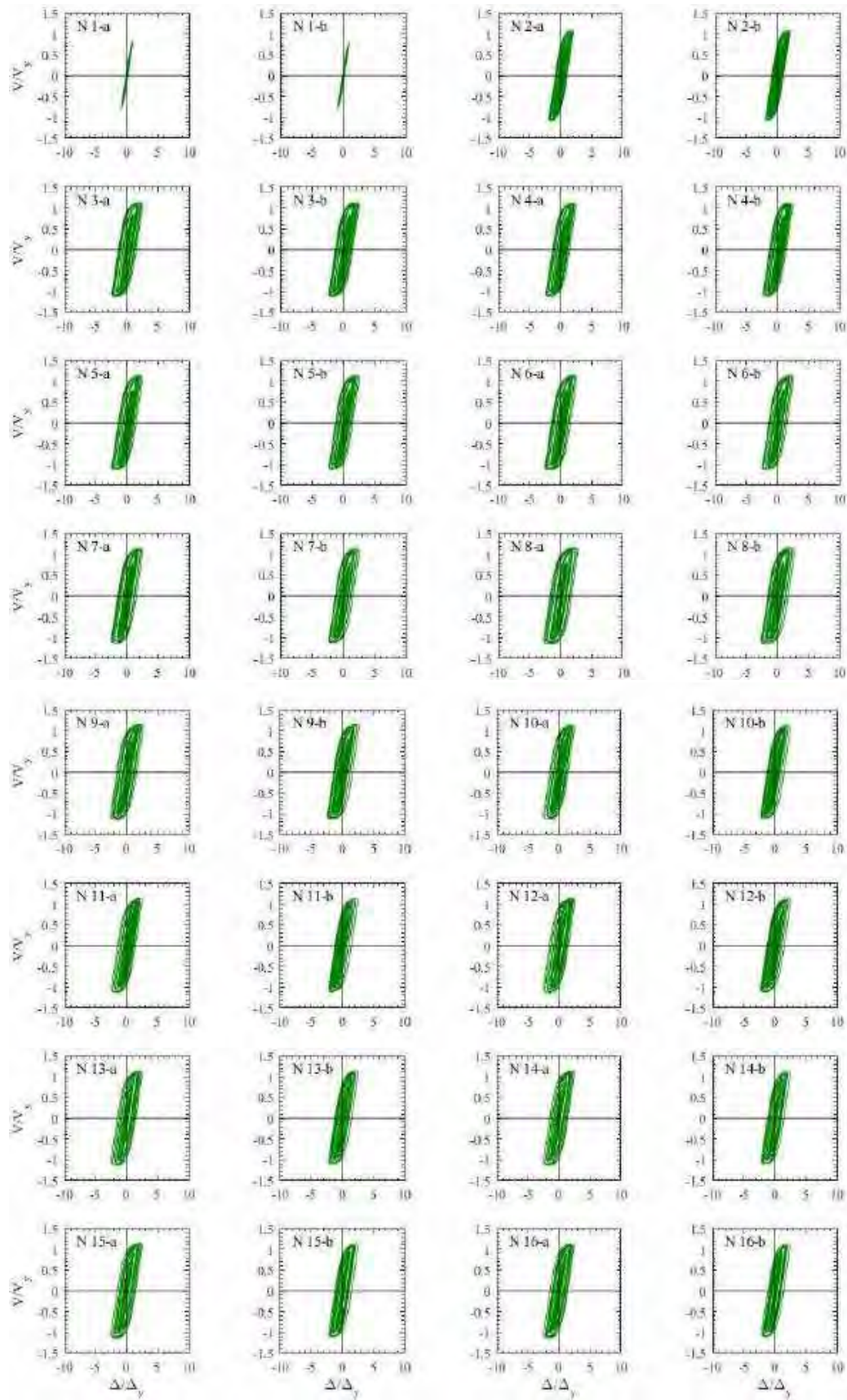


Figura H.13. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración MI15-A (2017)



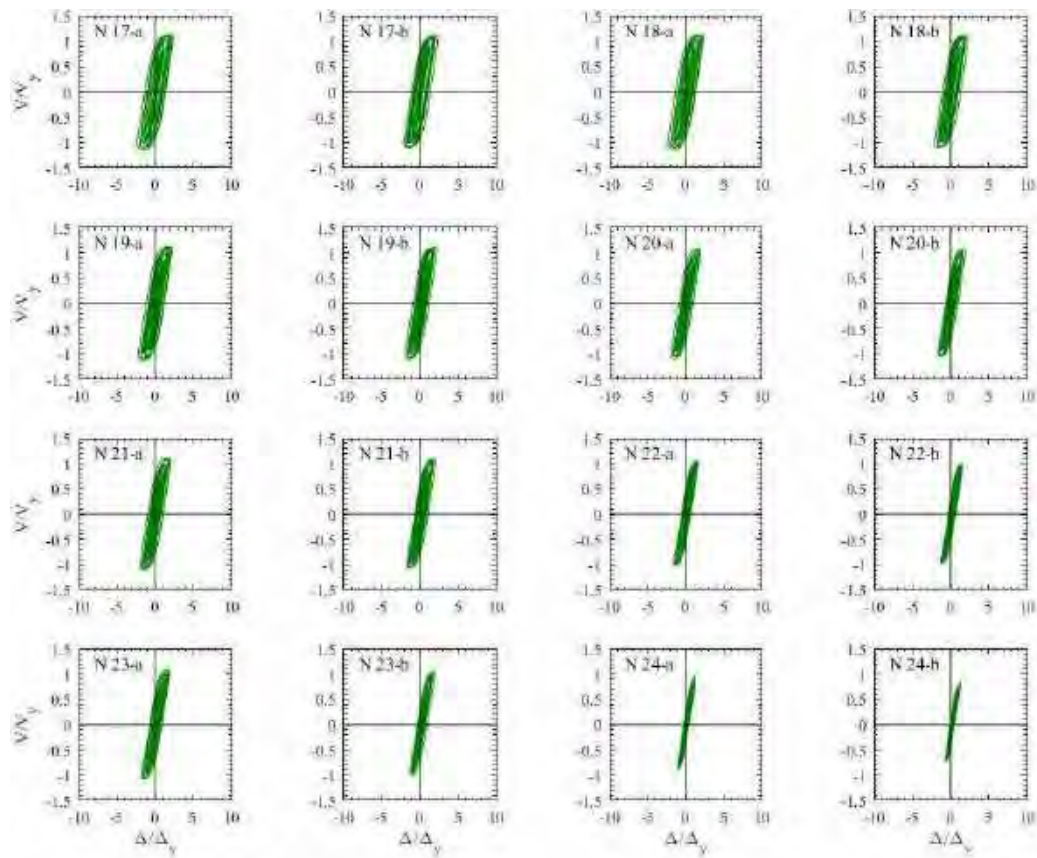
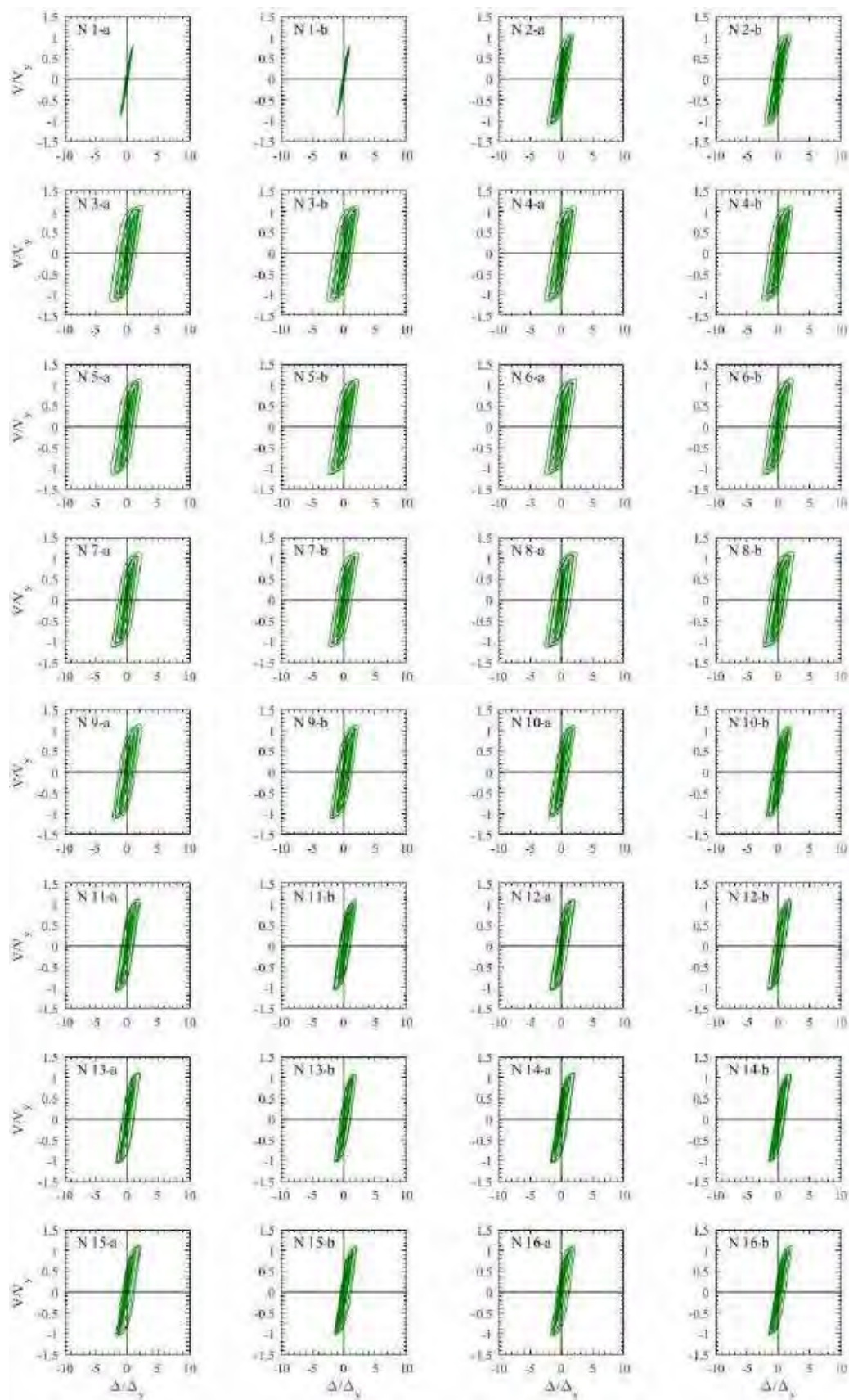


Figura H.14. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración MI15-B (2017)



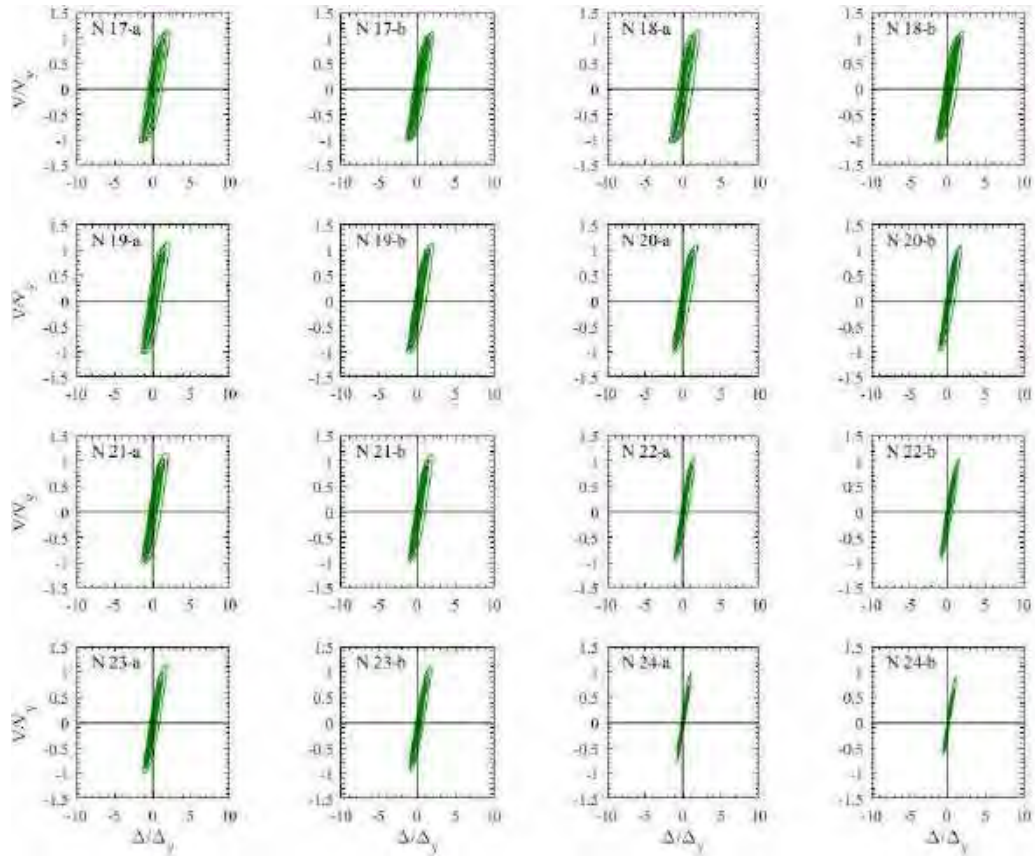
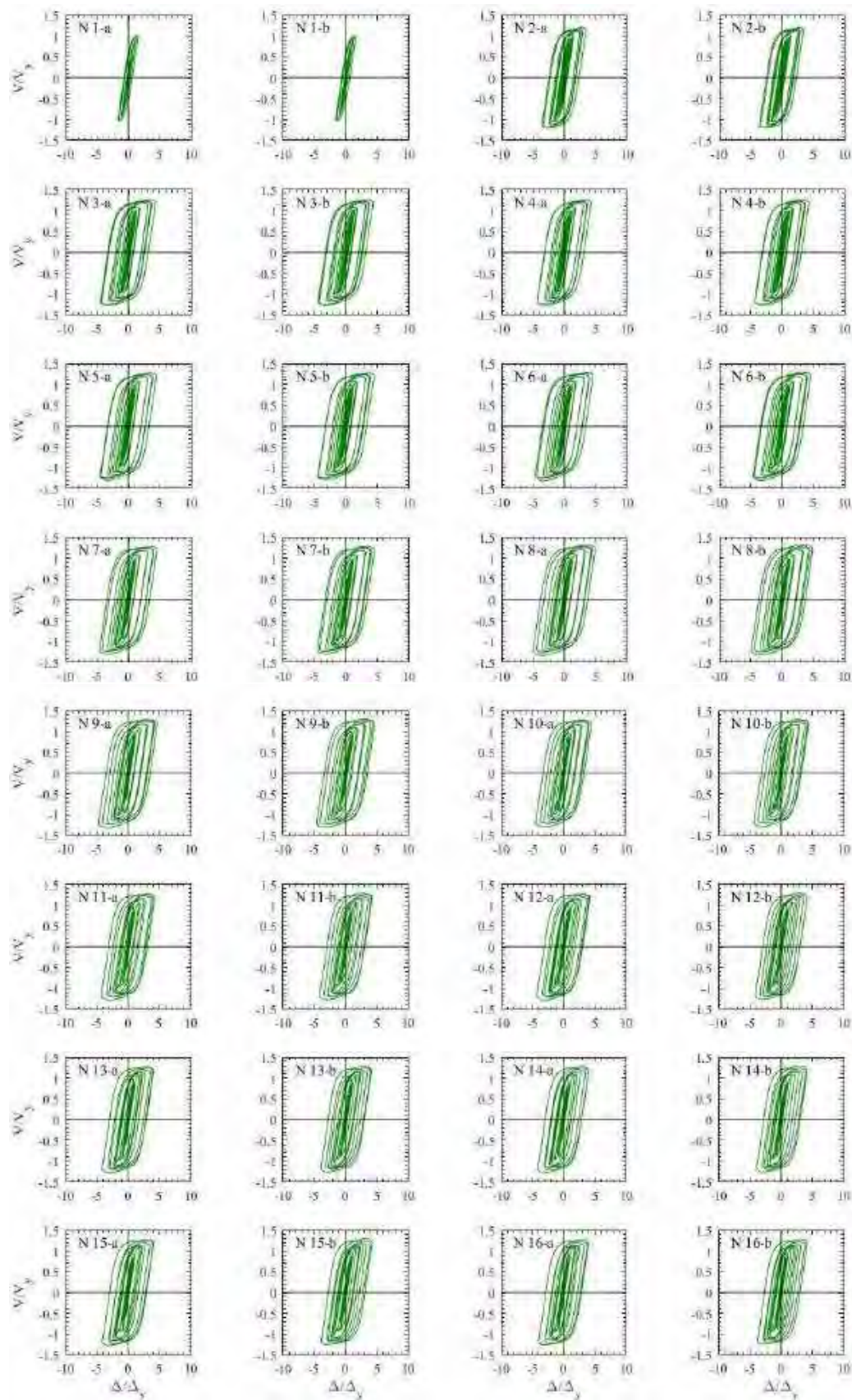


Figura H.15. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración XO36-A (2017)



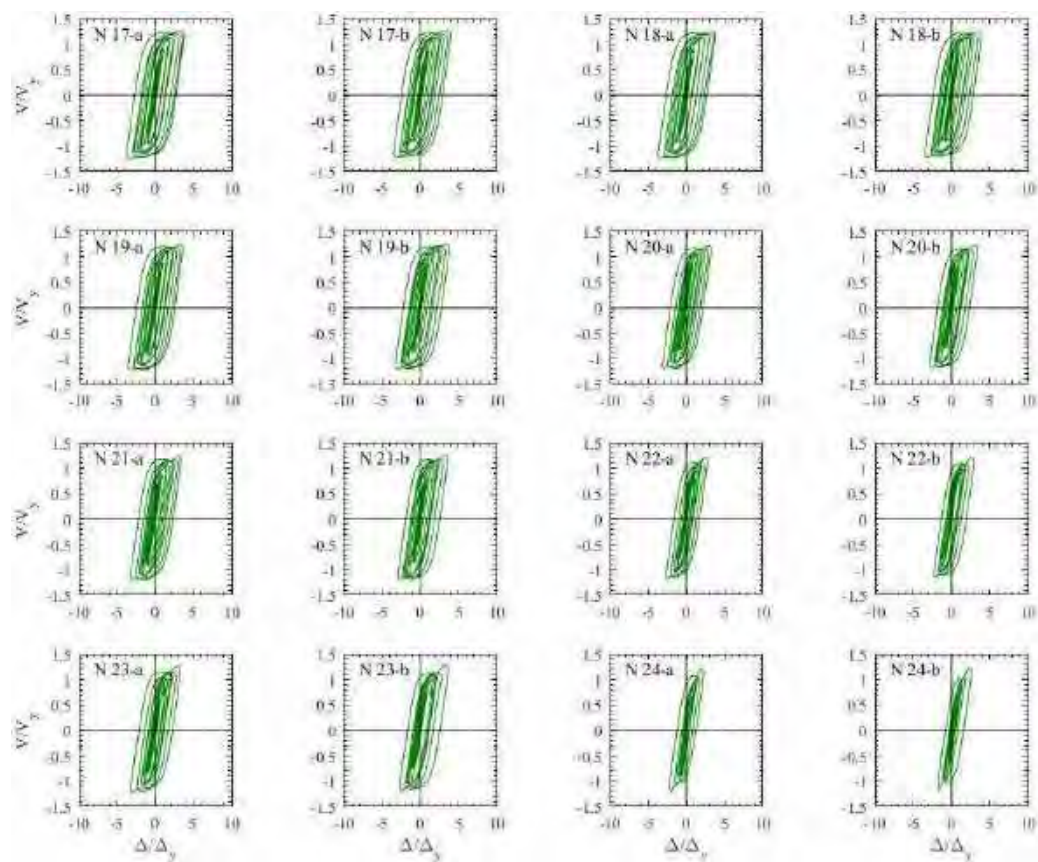
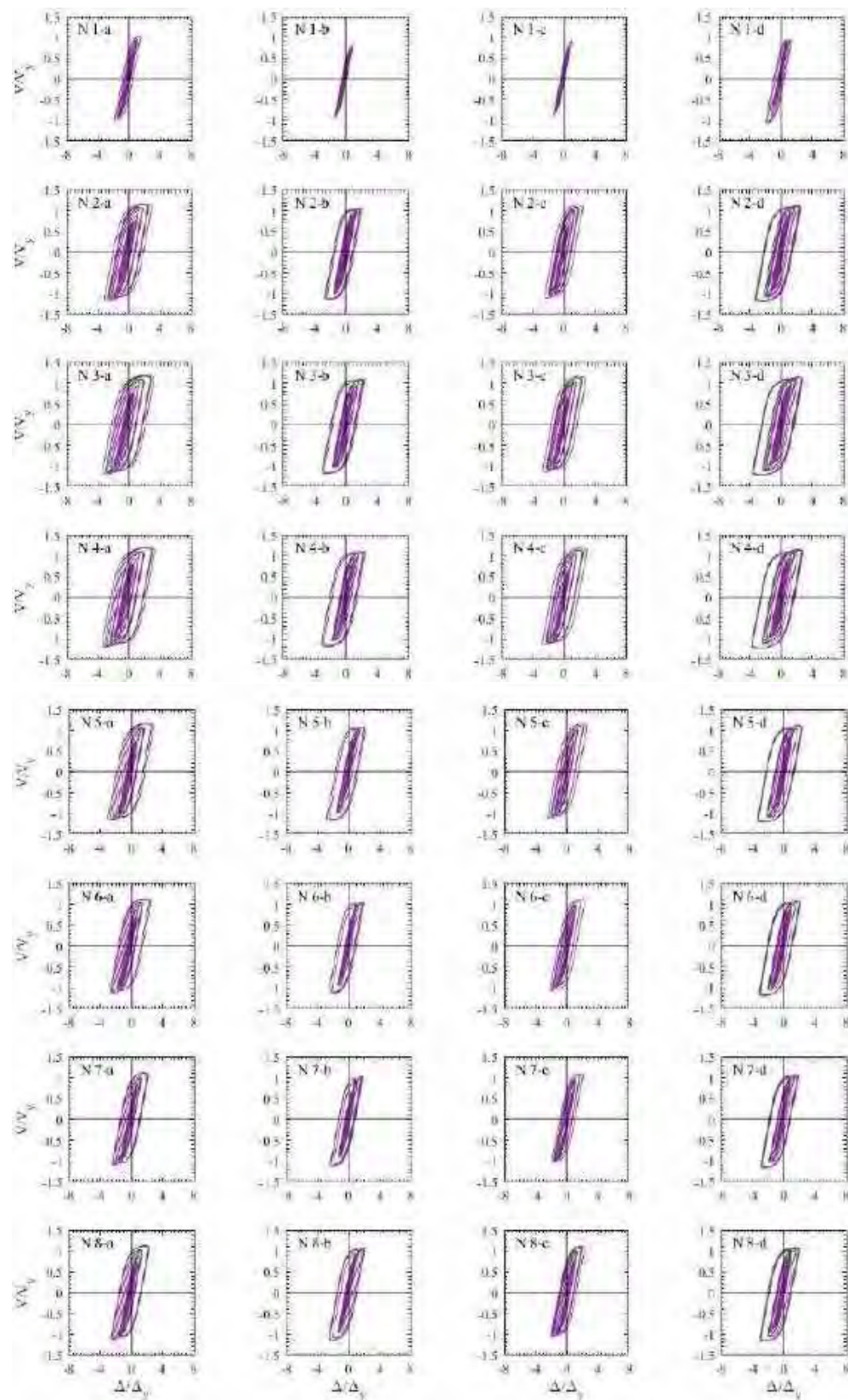
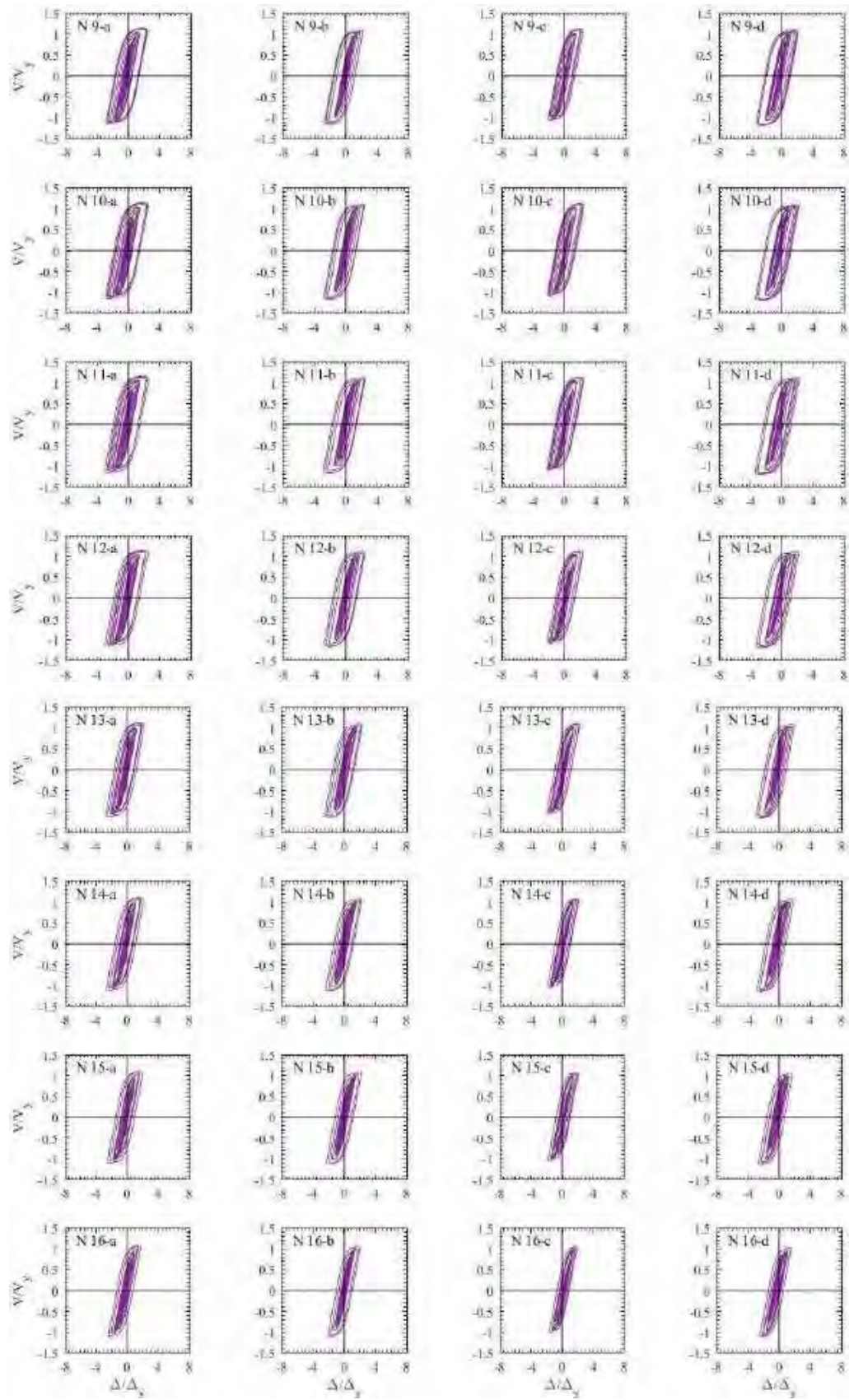


Figura H.16. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.1.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB





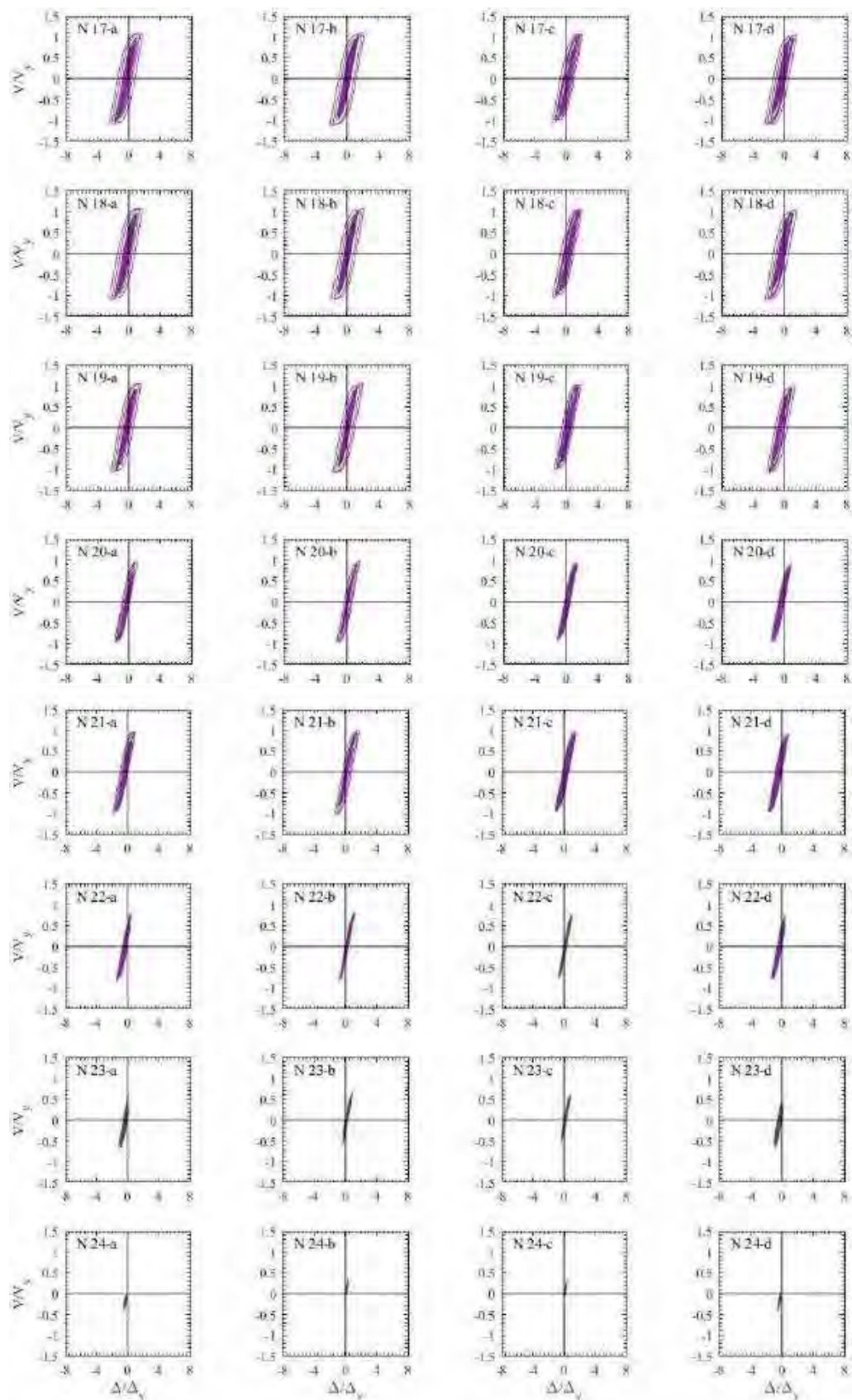
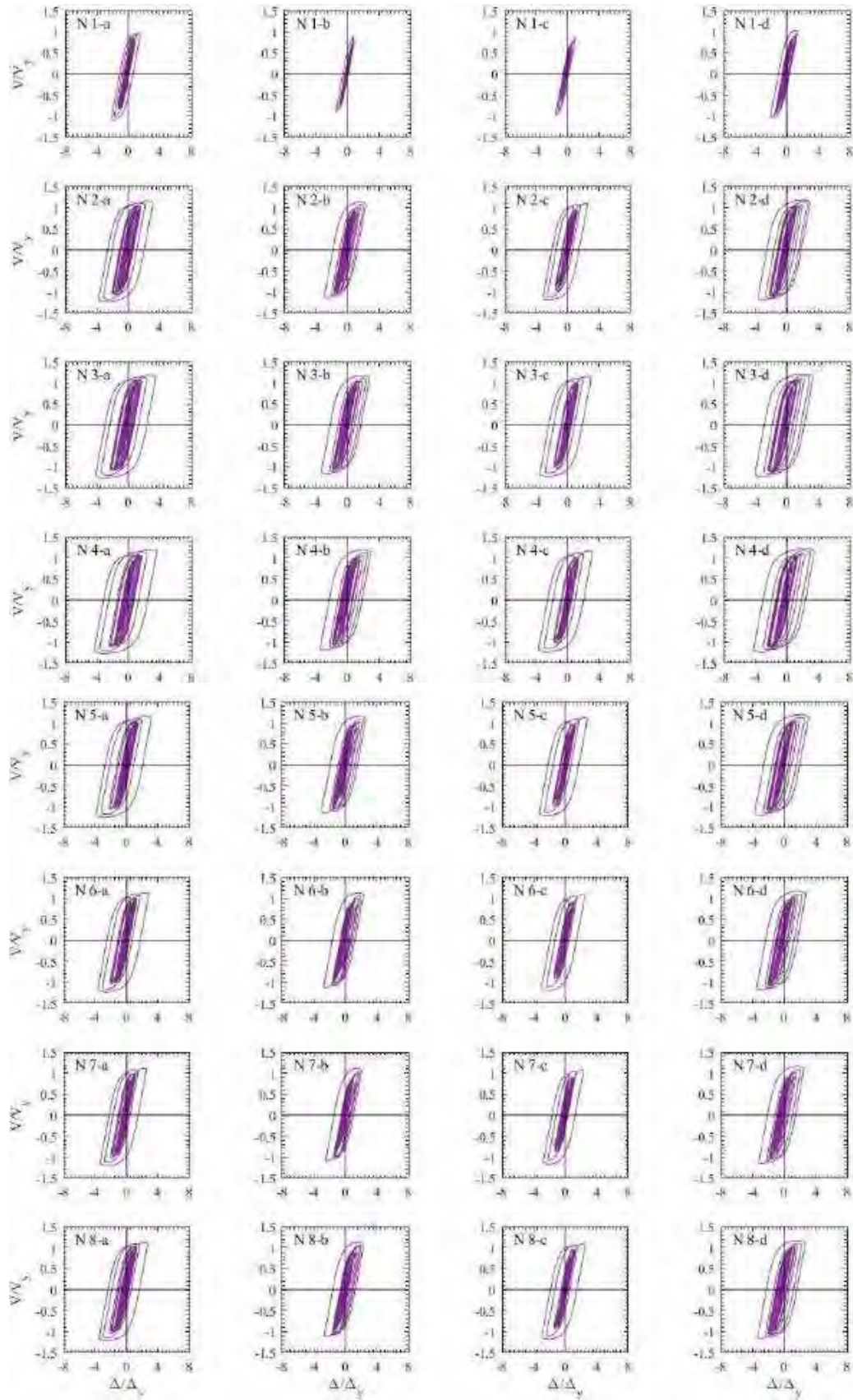
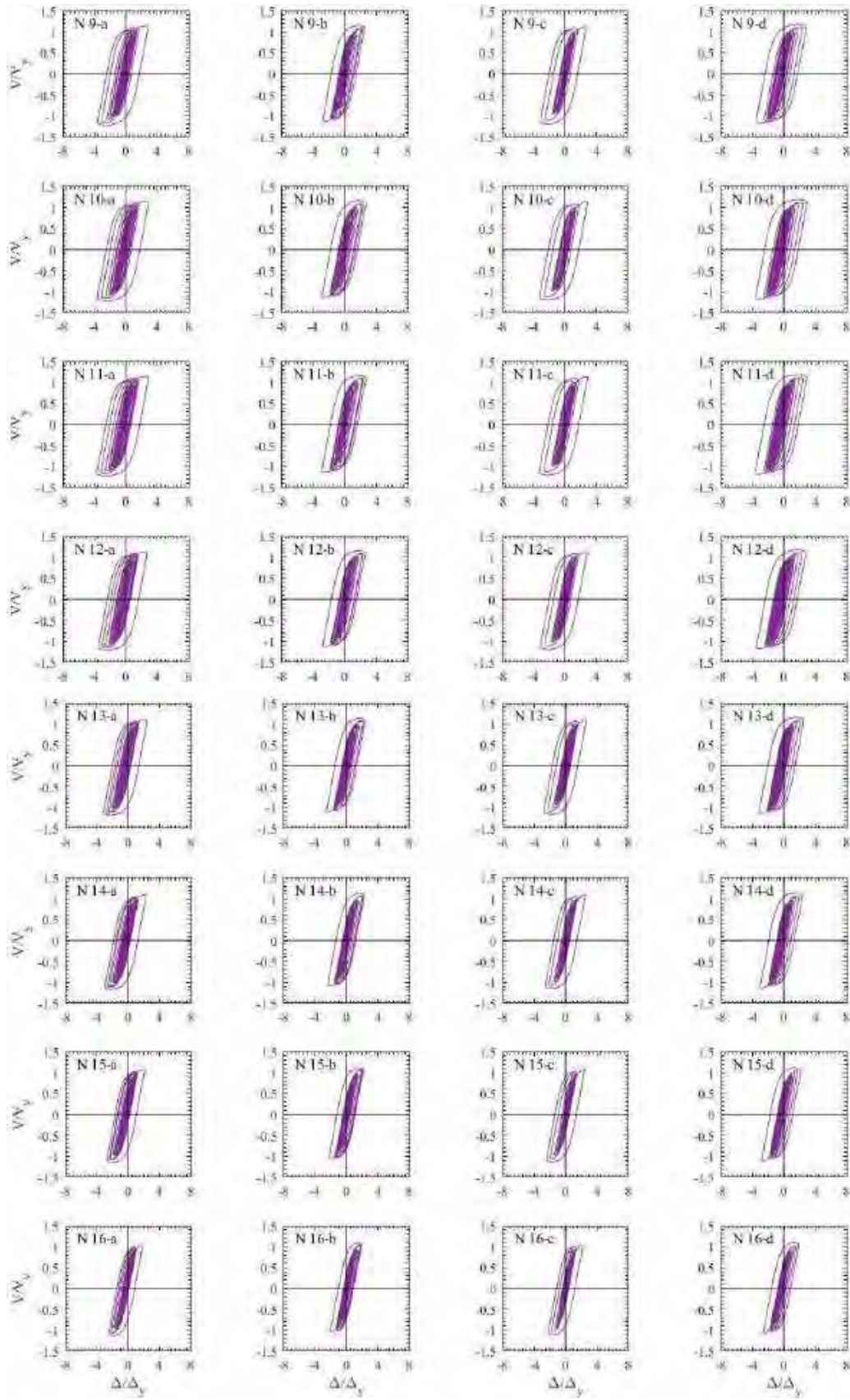


Figura H.17. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración TL08-A





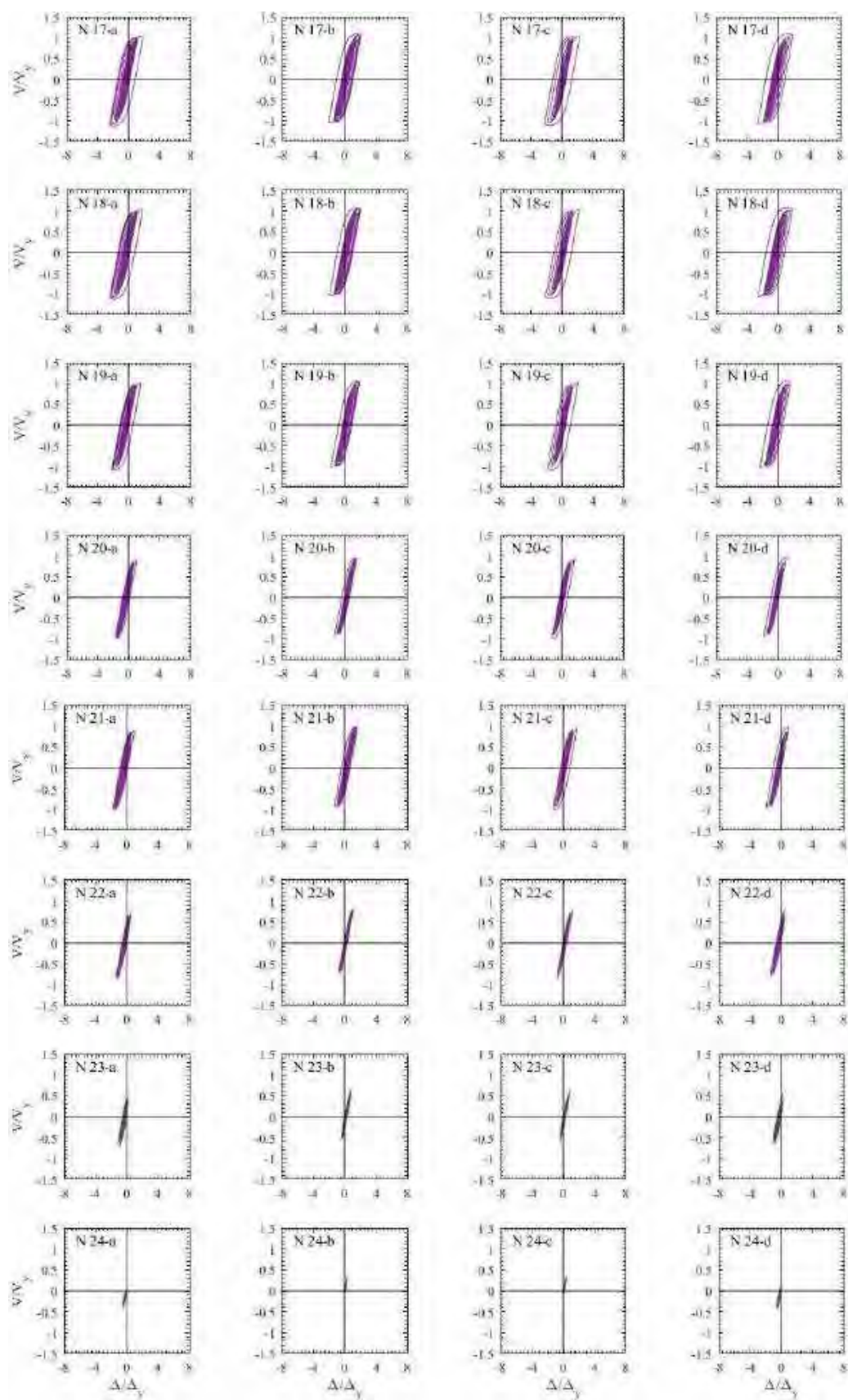
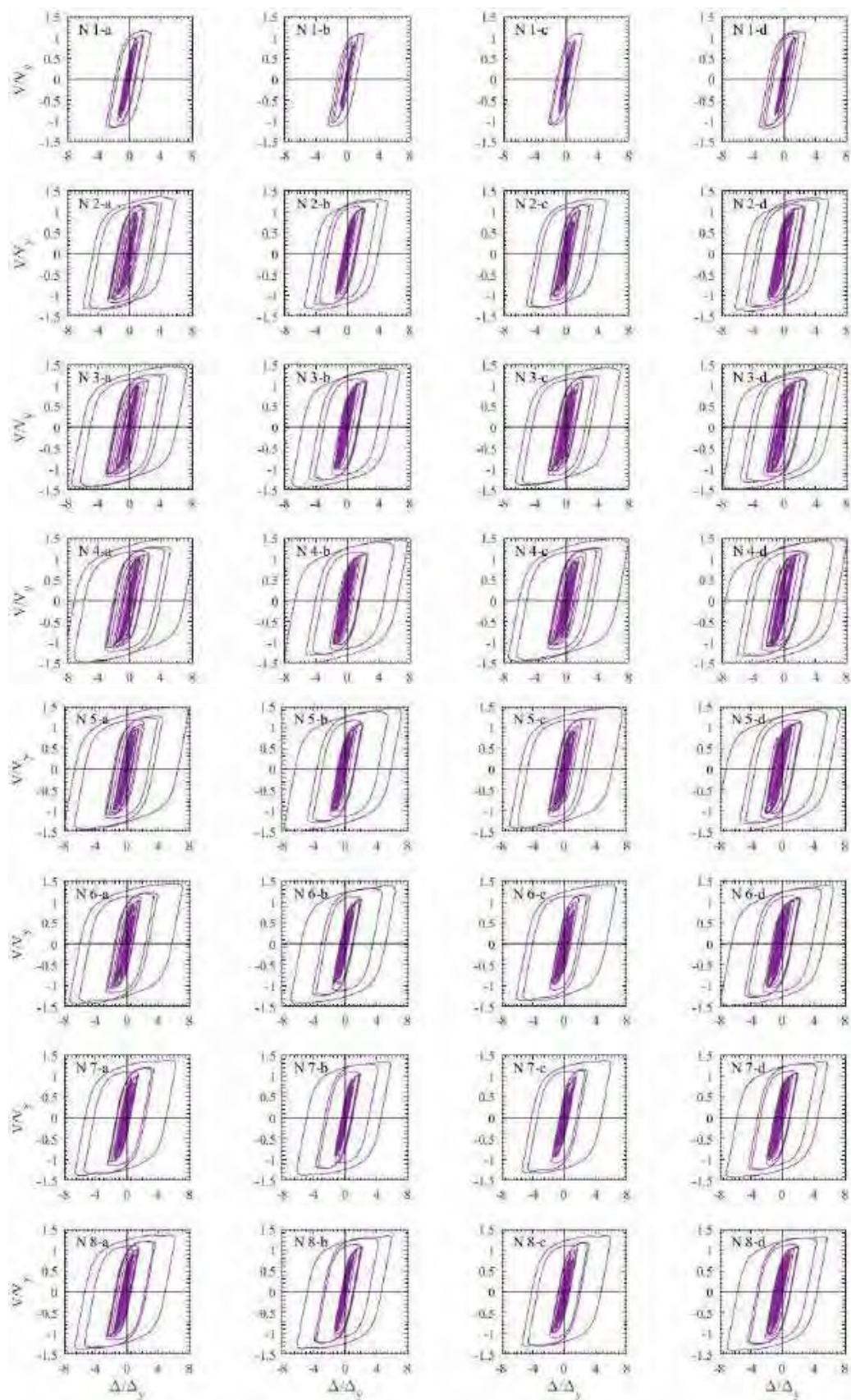
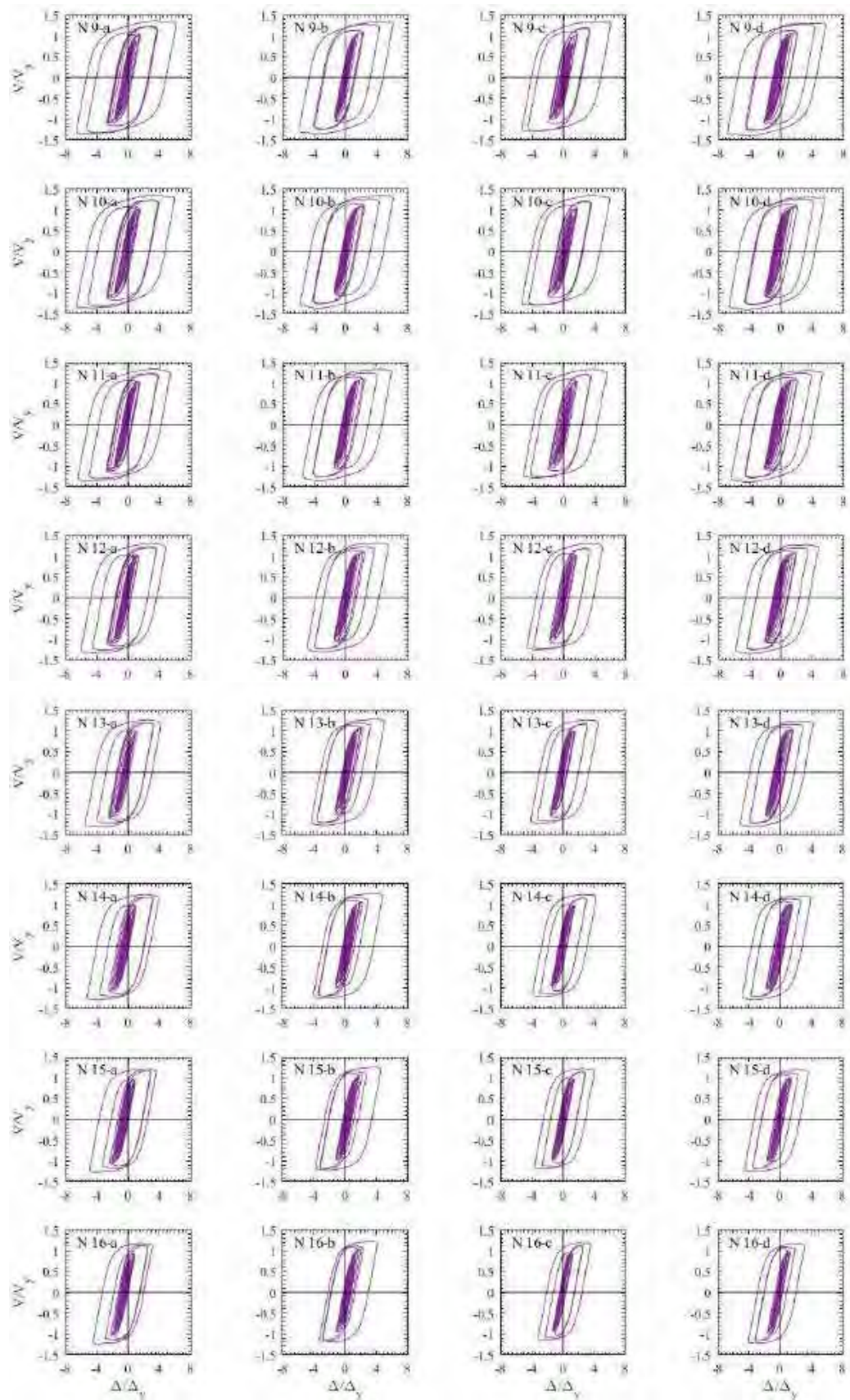


Figura H.18. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración TL08-B





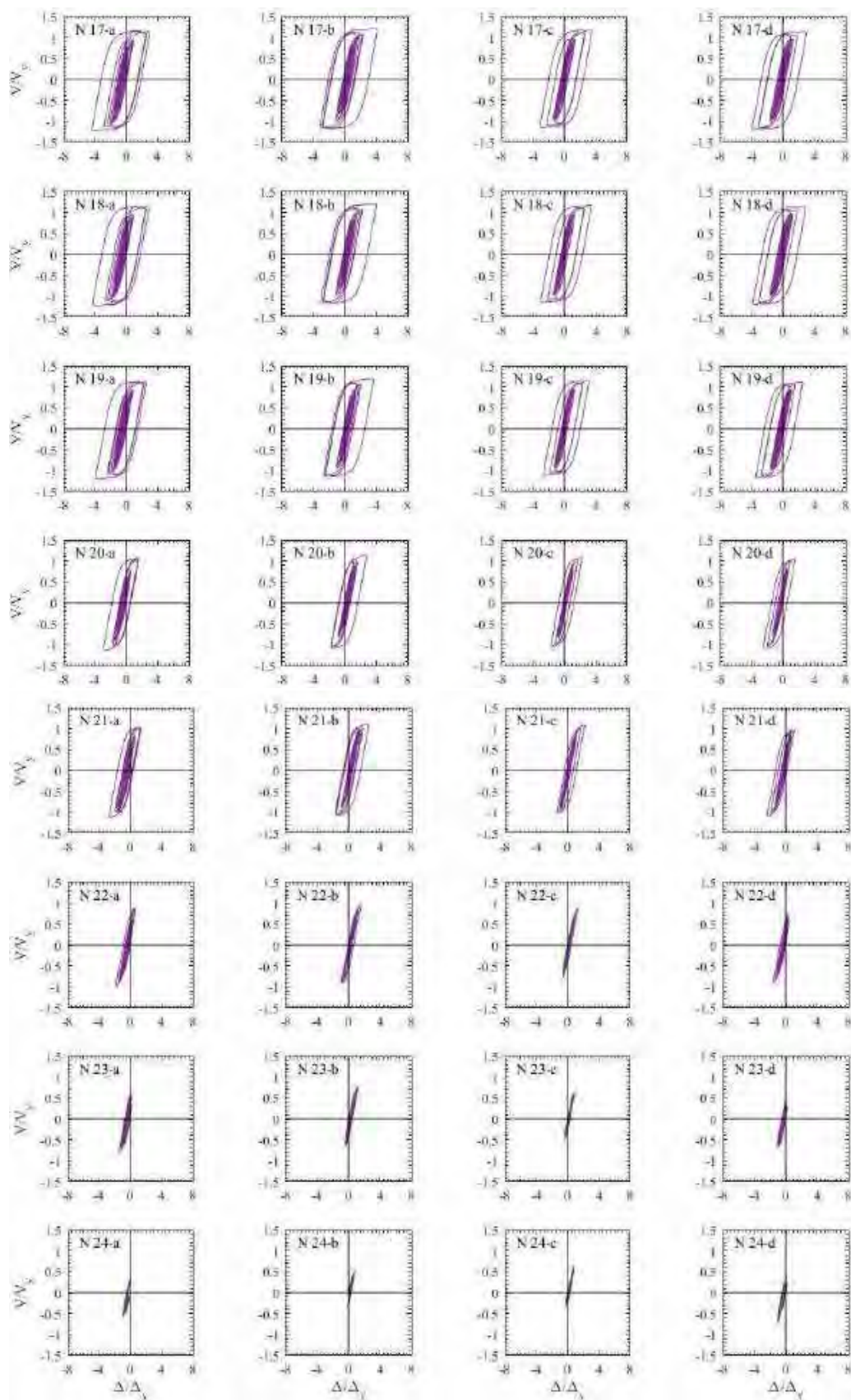
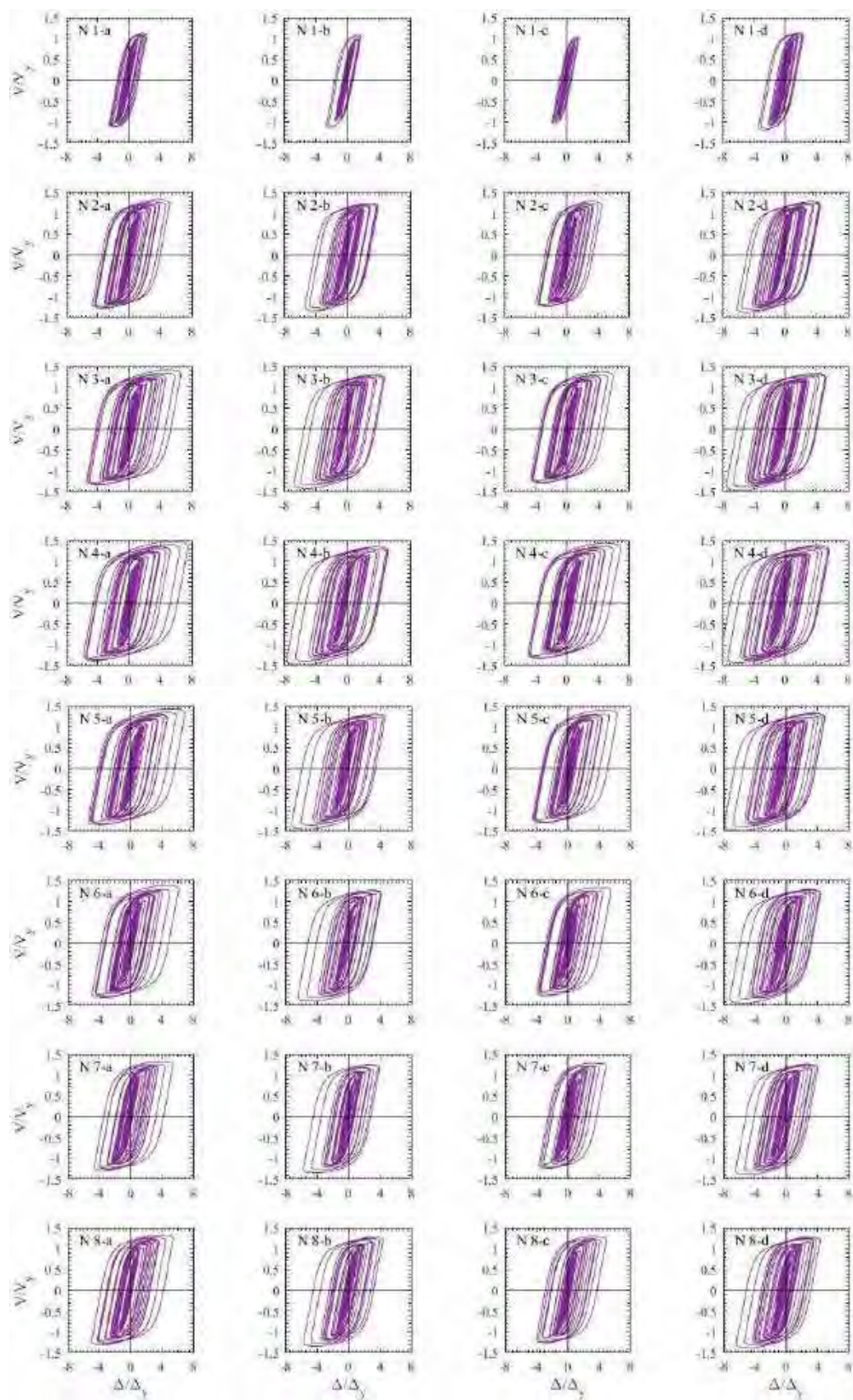
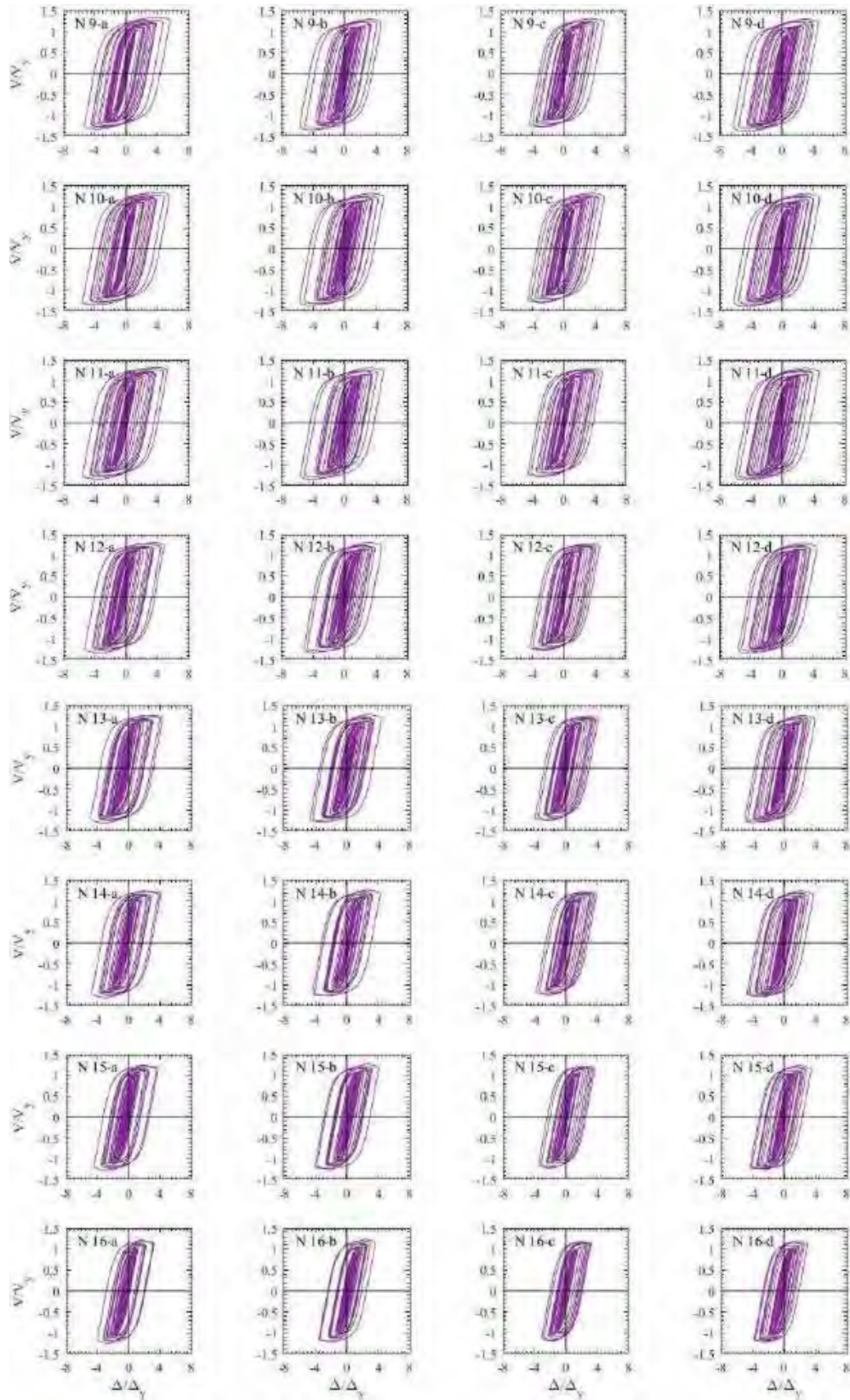


Figura H.19. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CJ03-A





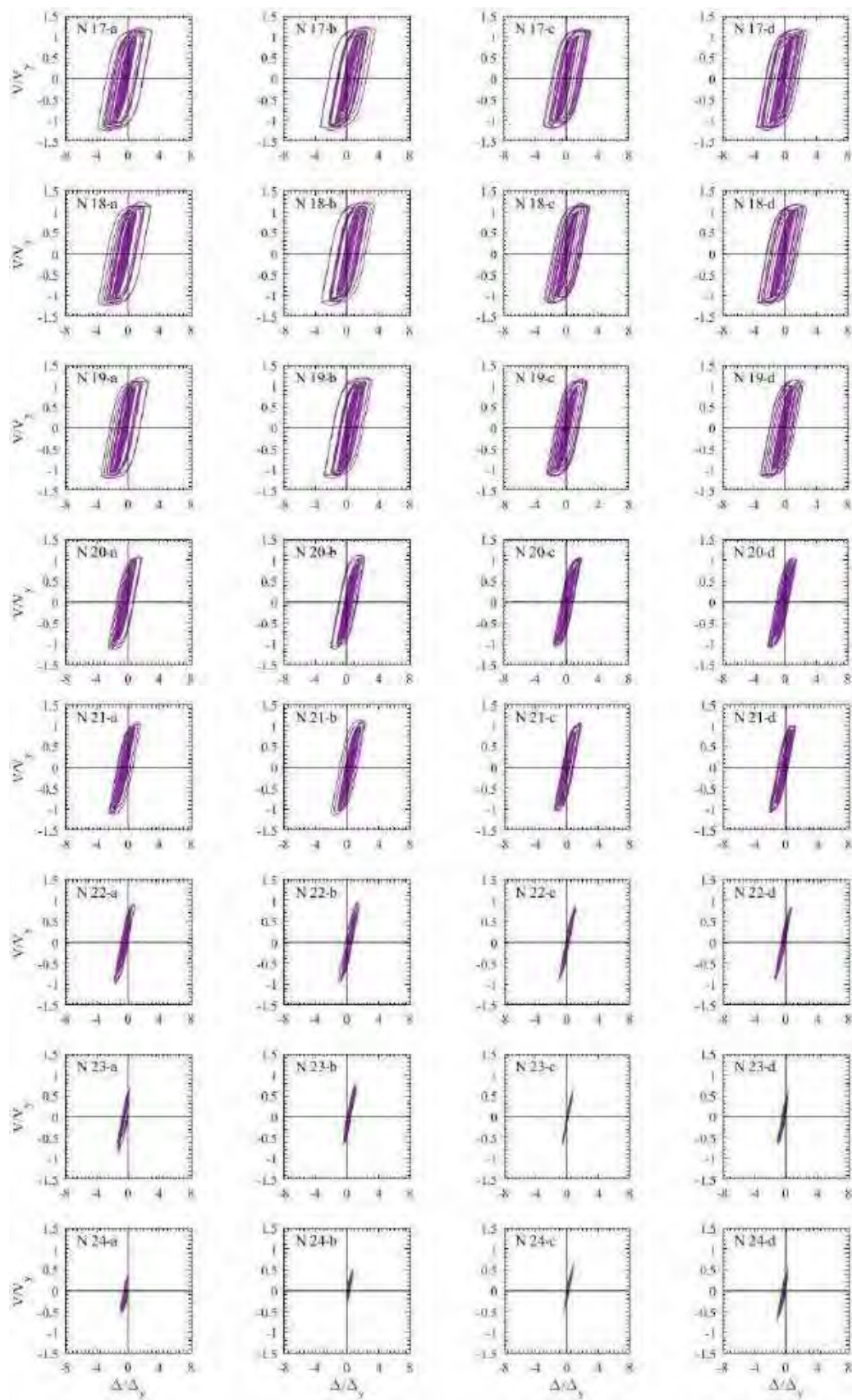
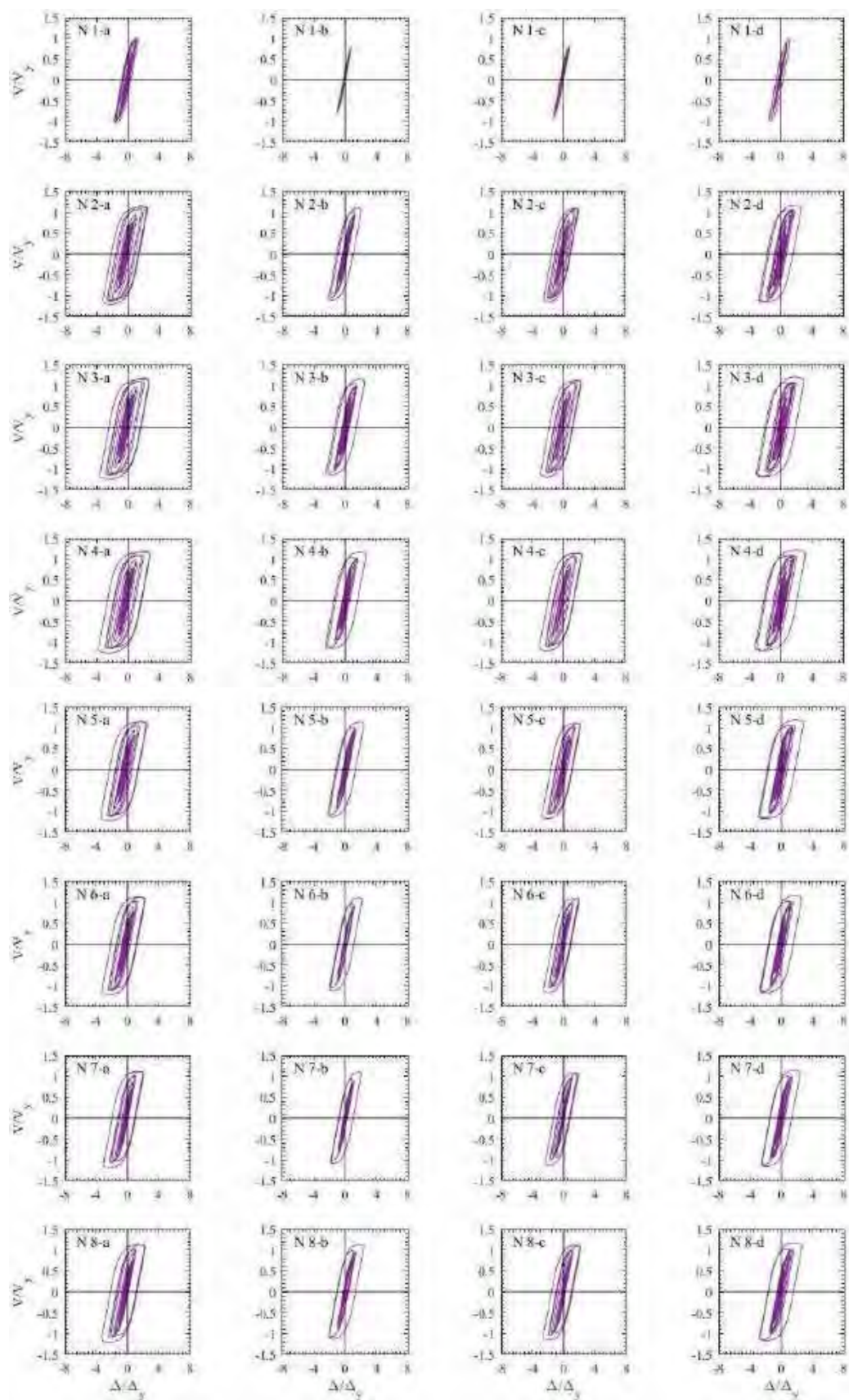
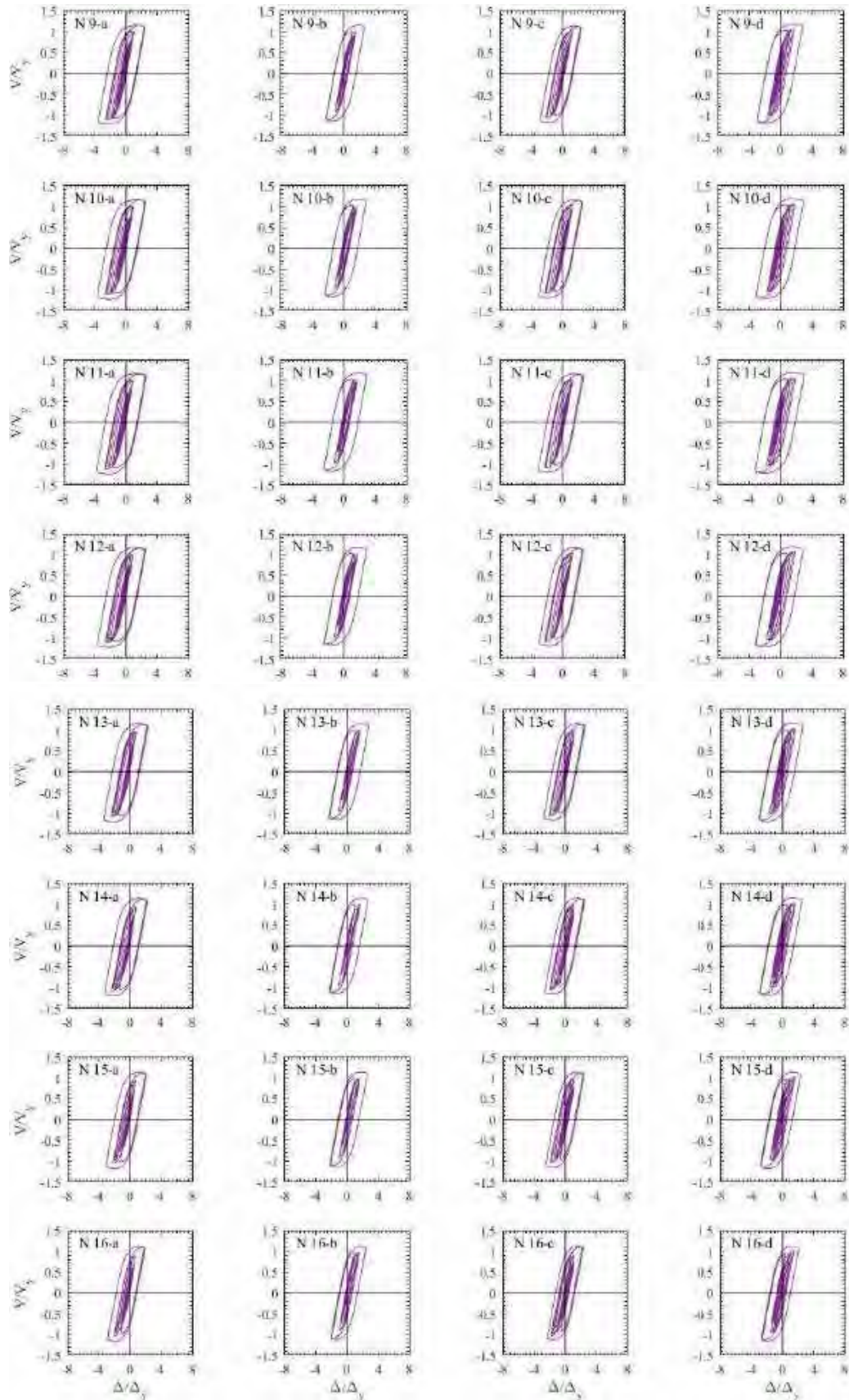


Figura H.20. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CJ03-B





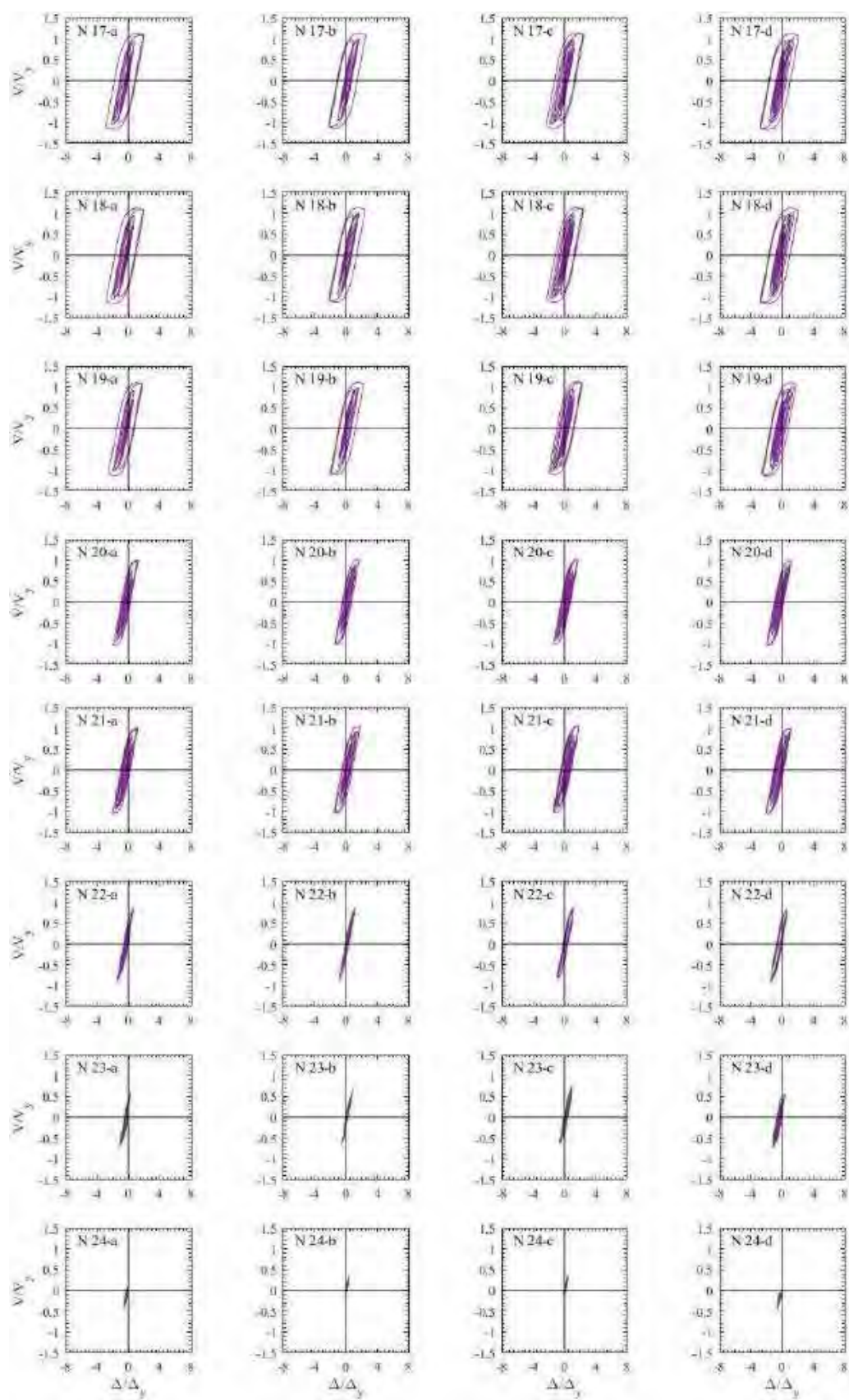
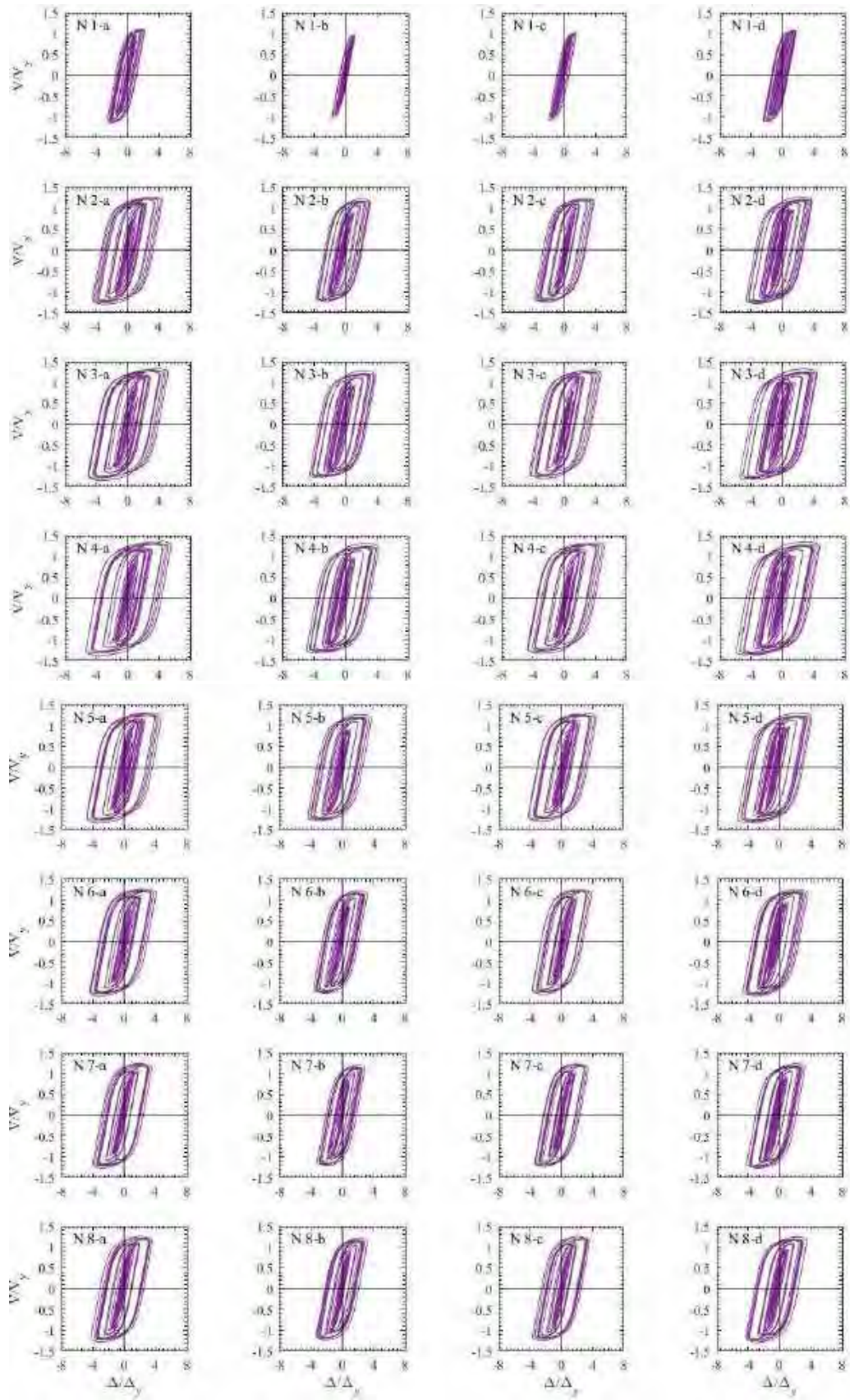
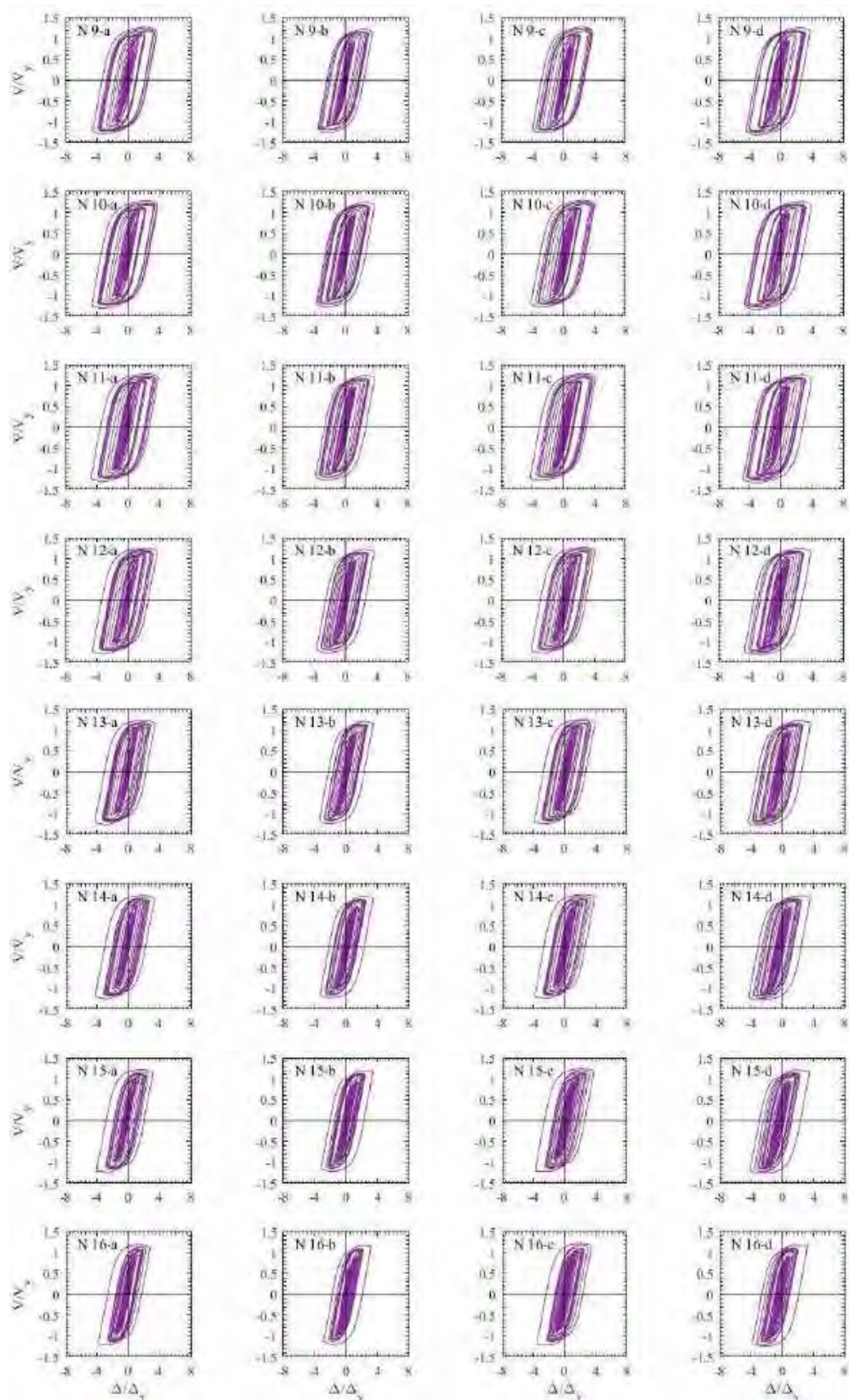


Figura H.21. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración ALAM85-A





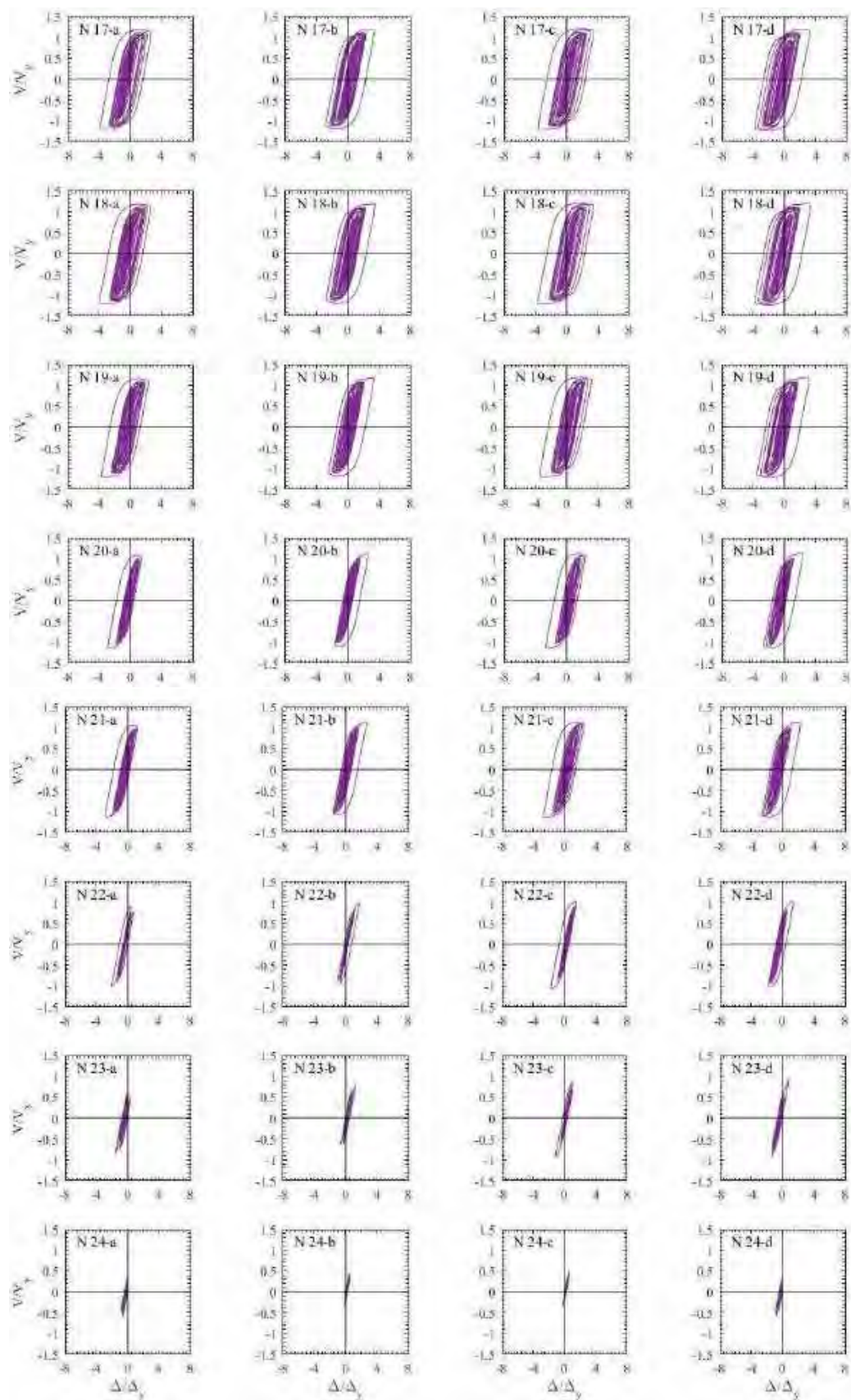
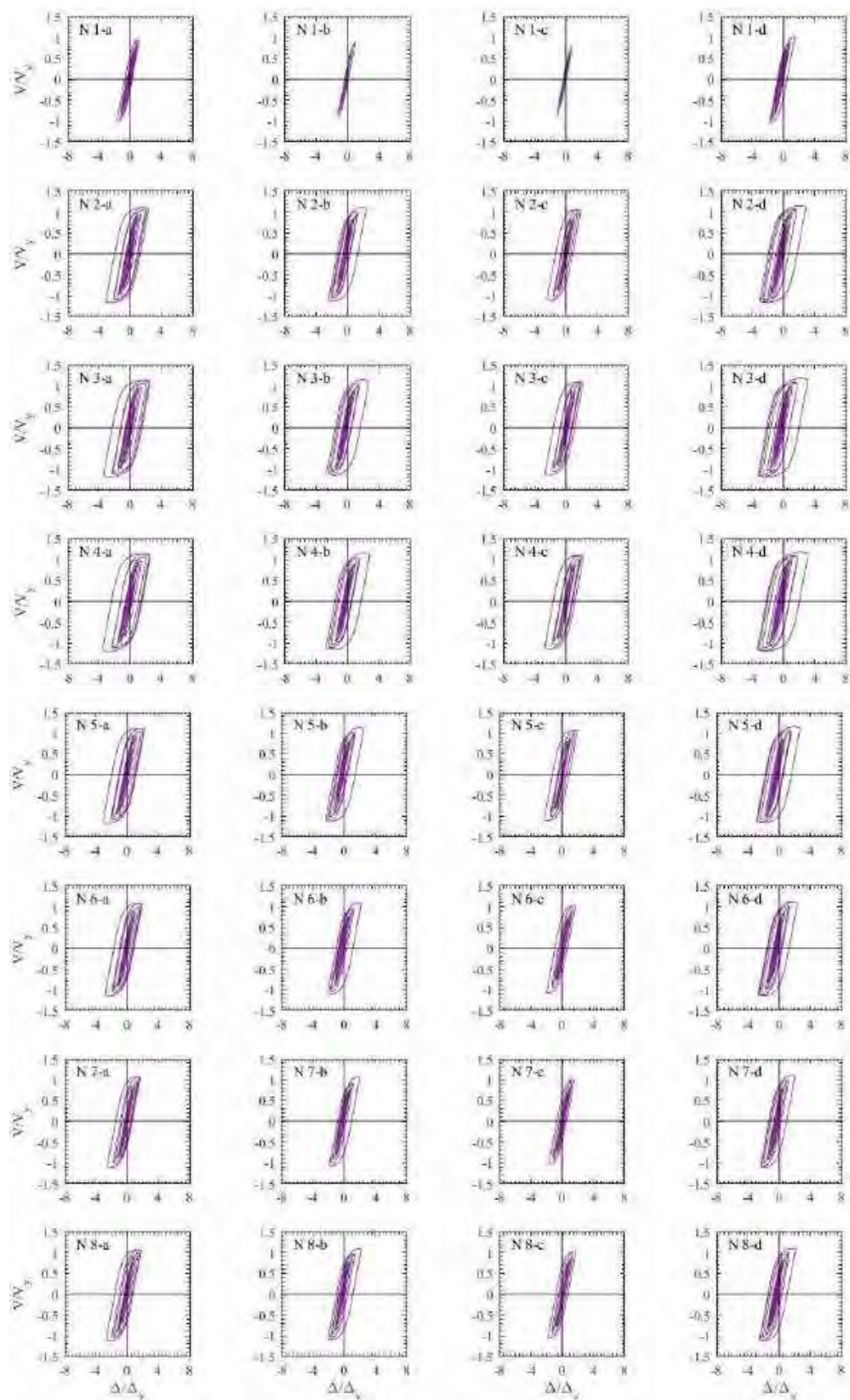
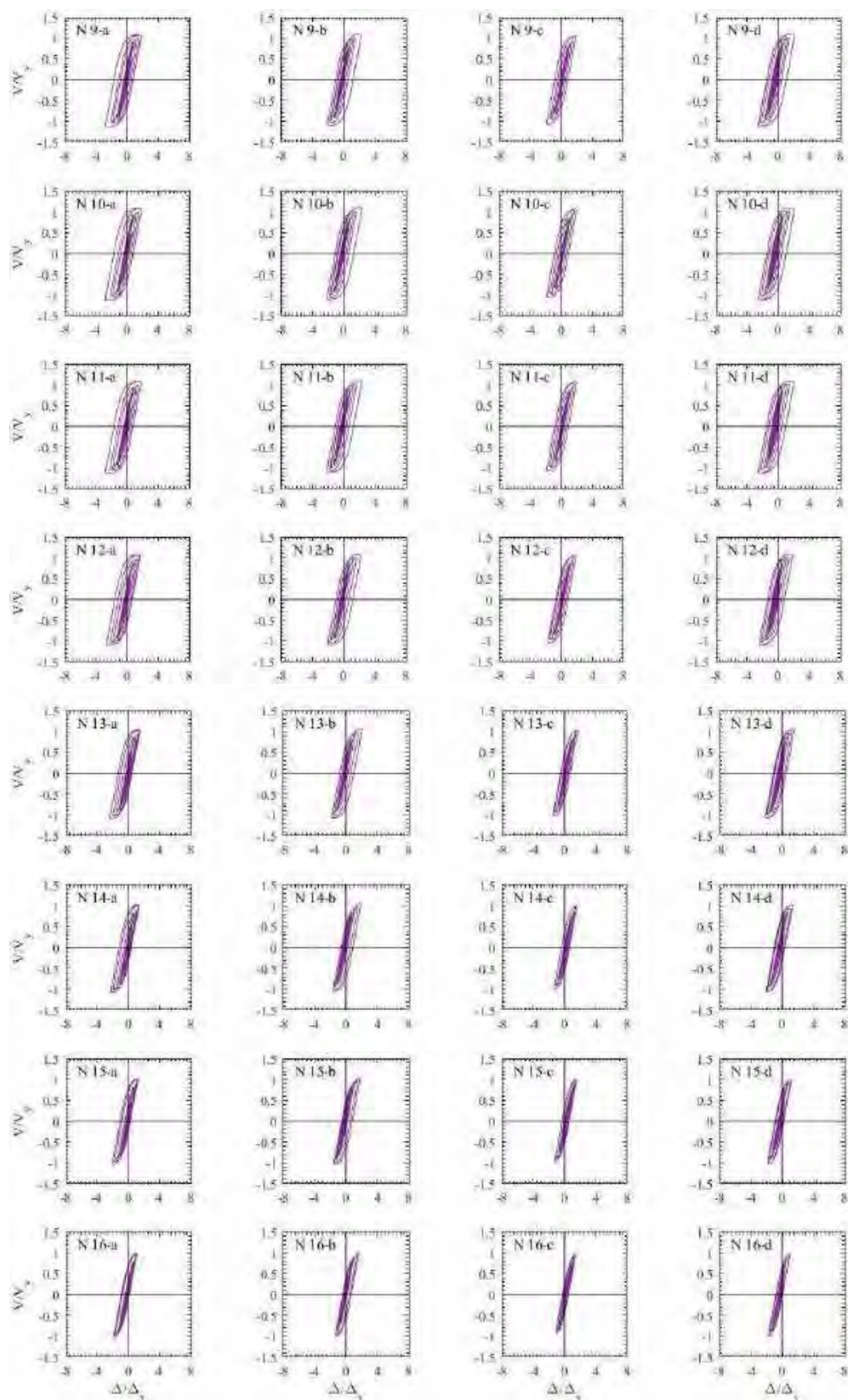


Figura H.22. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración ALAM85-B





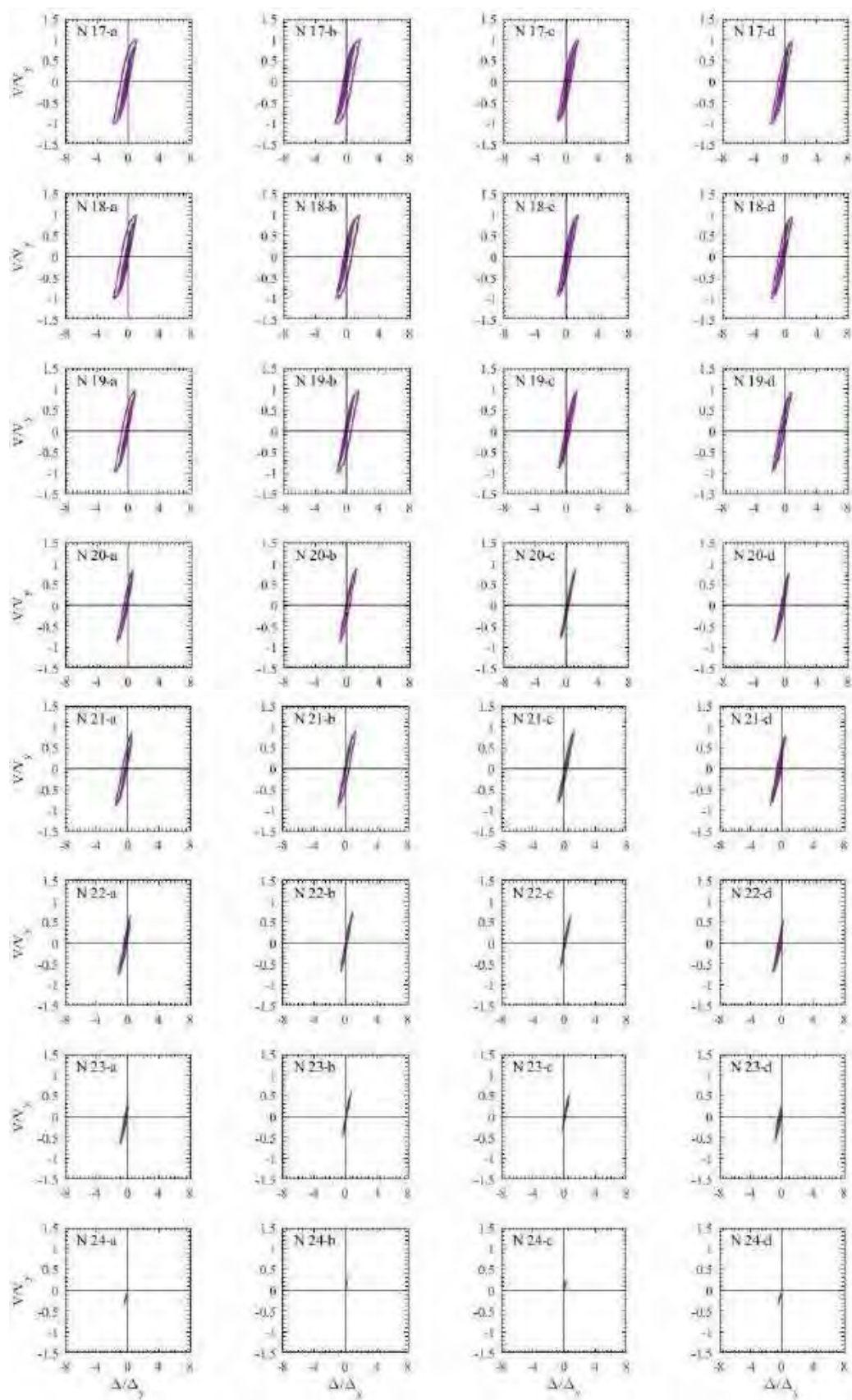
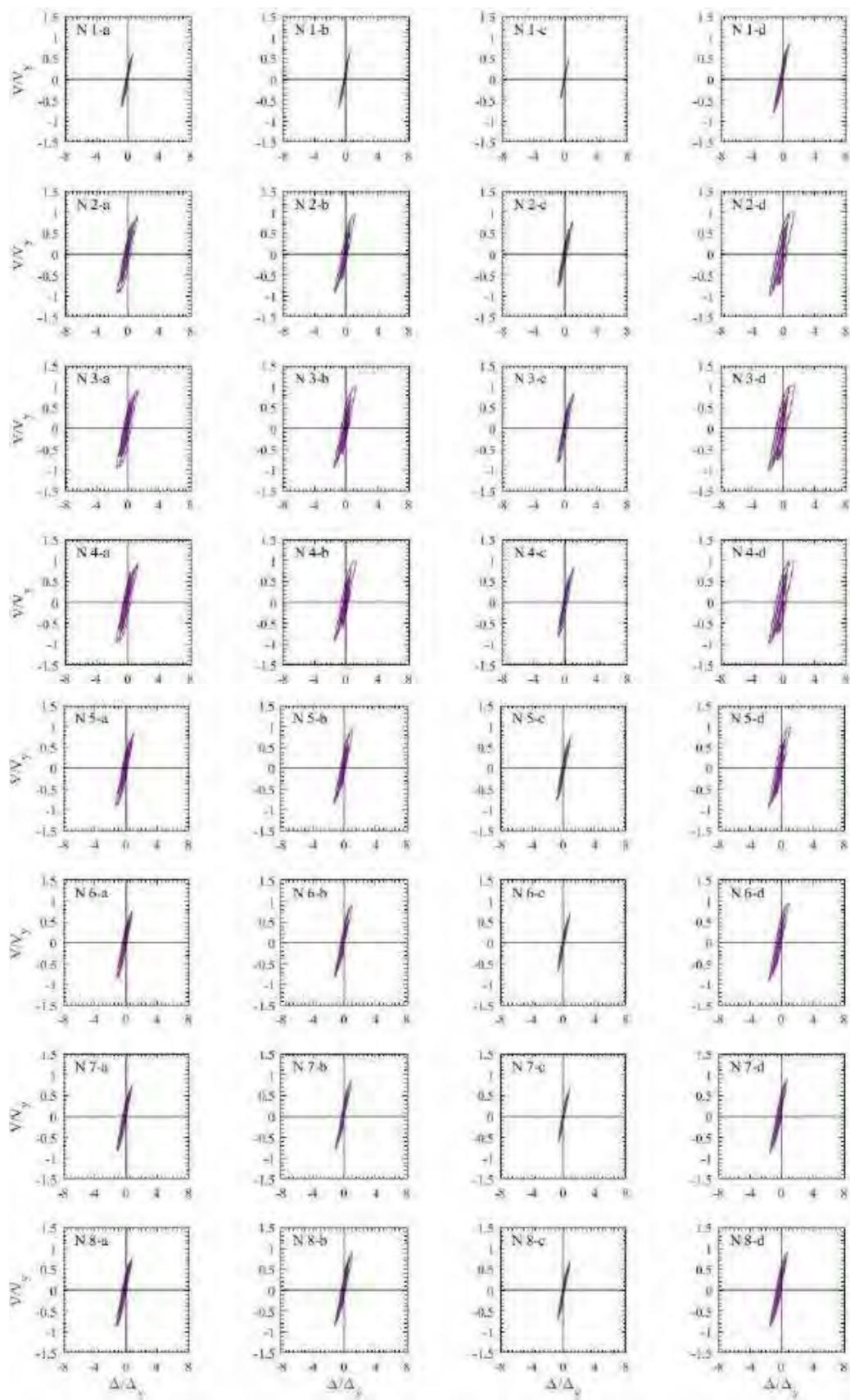
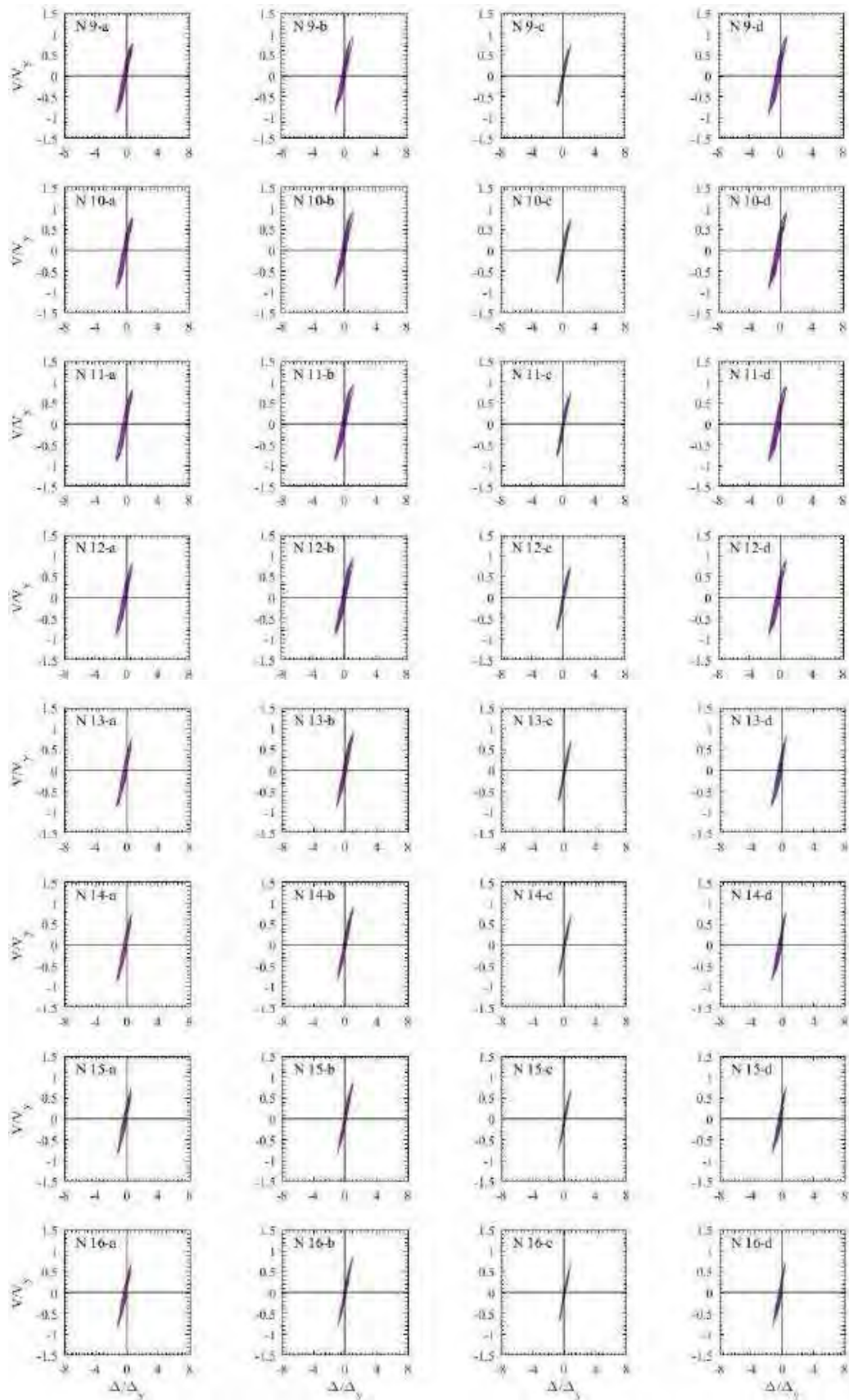


Figura H.23. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración TBOM-A (1985)





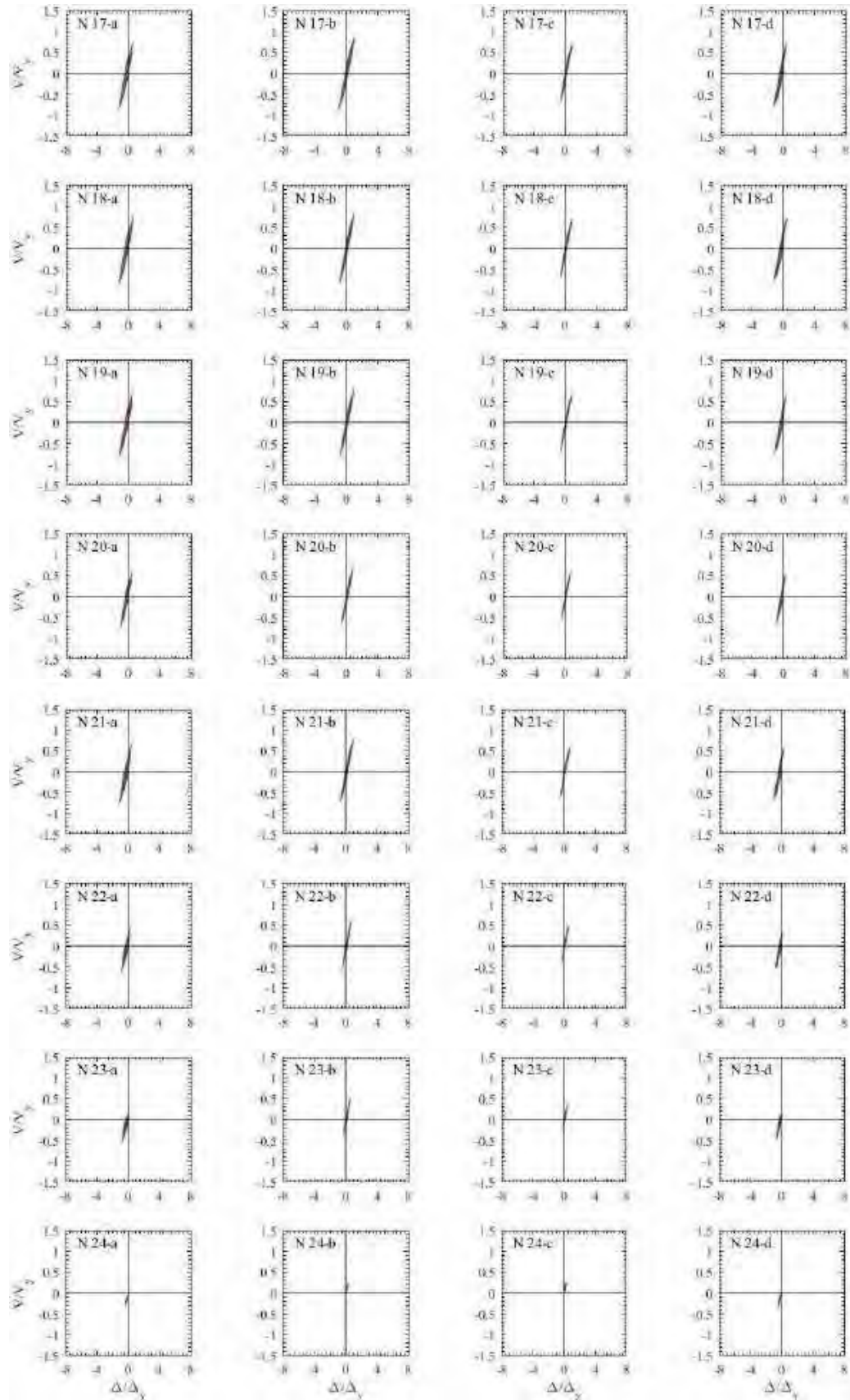
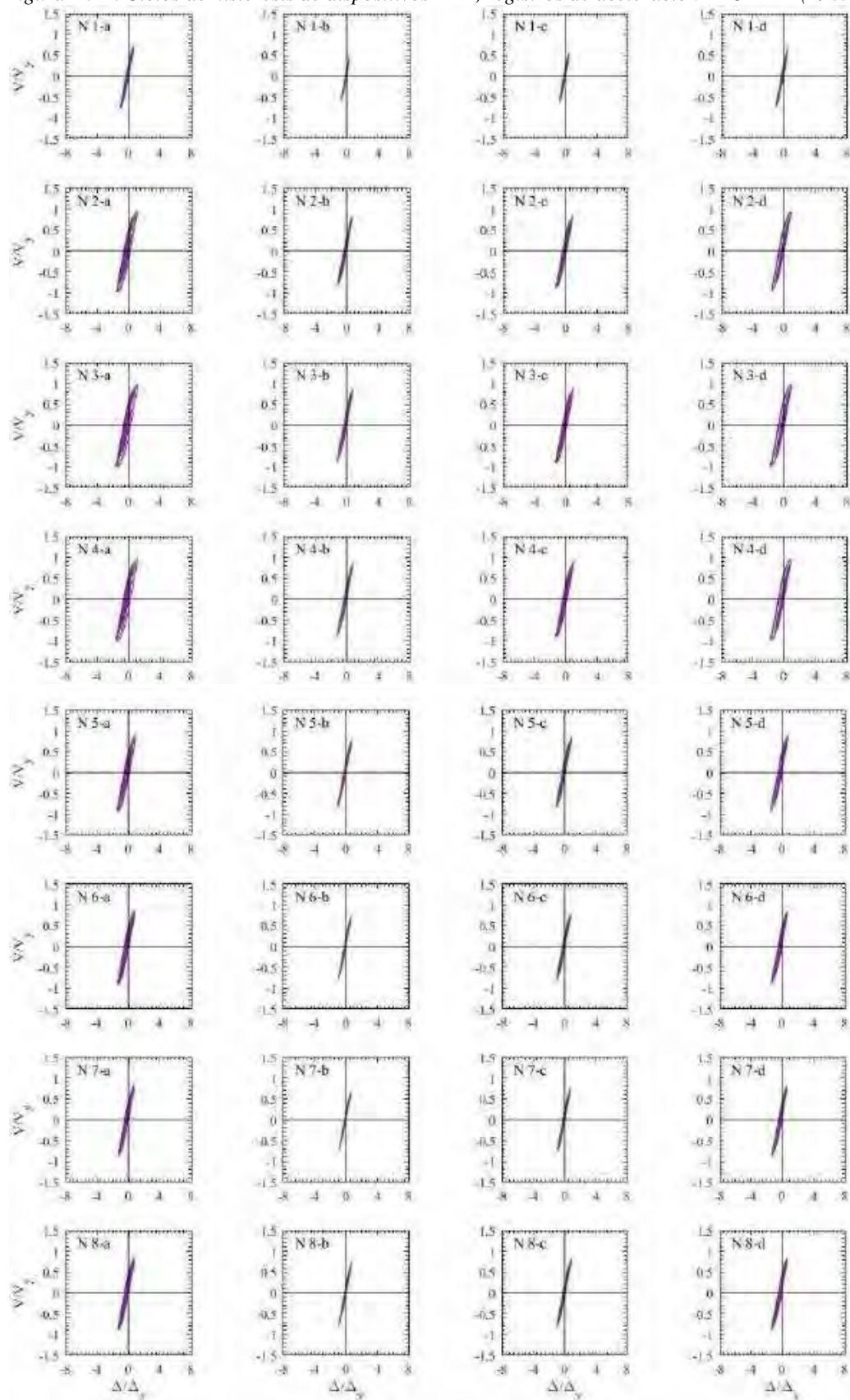
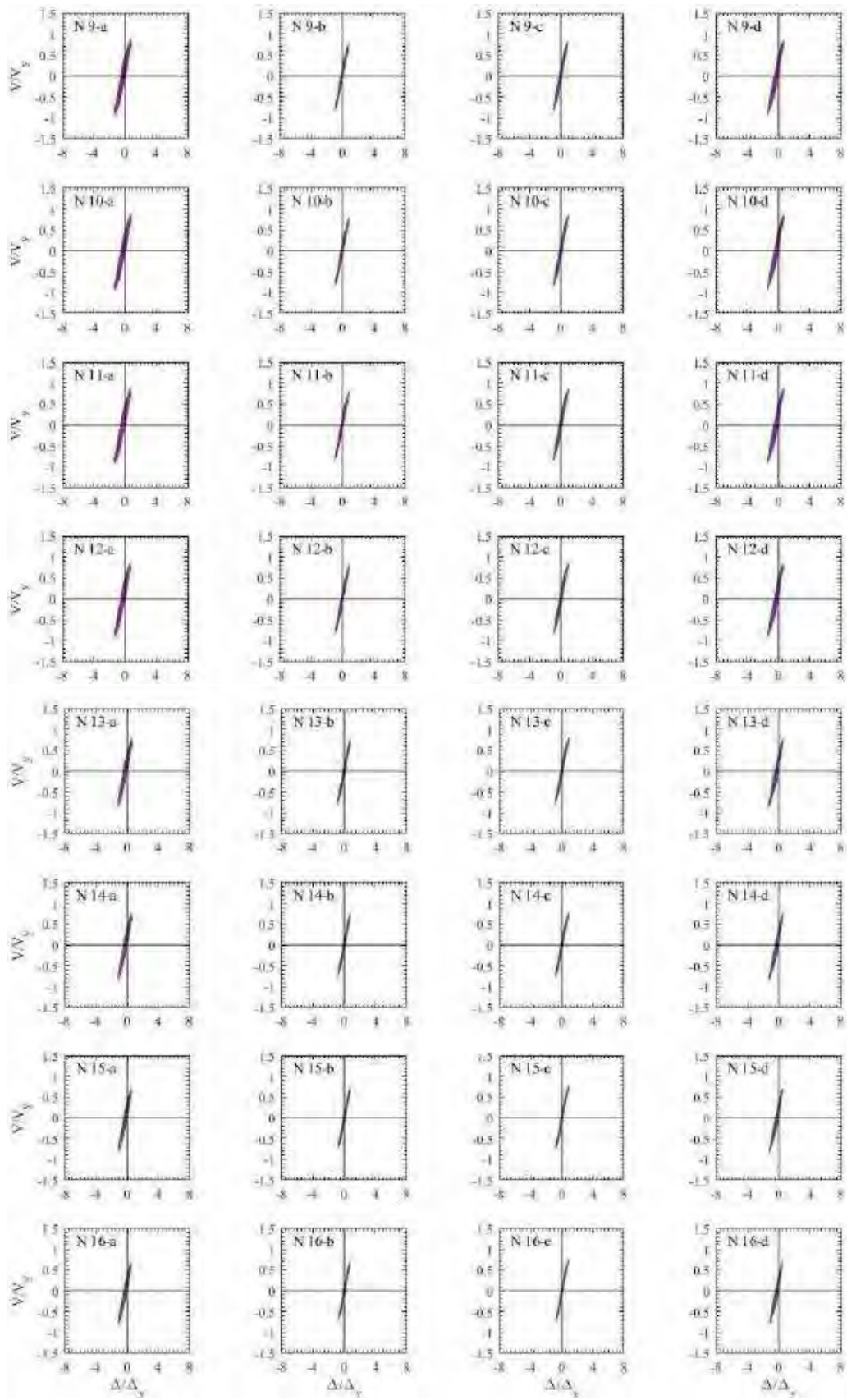


Figura H.24. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración TBOM –B (1985)





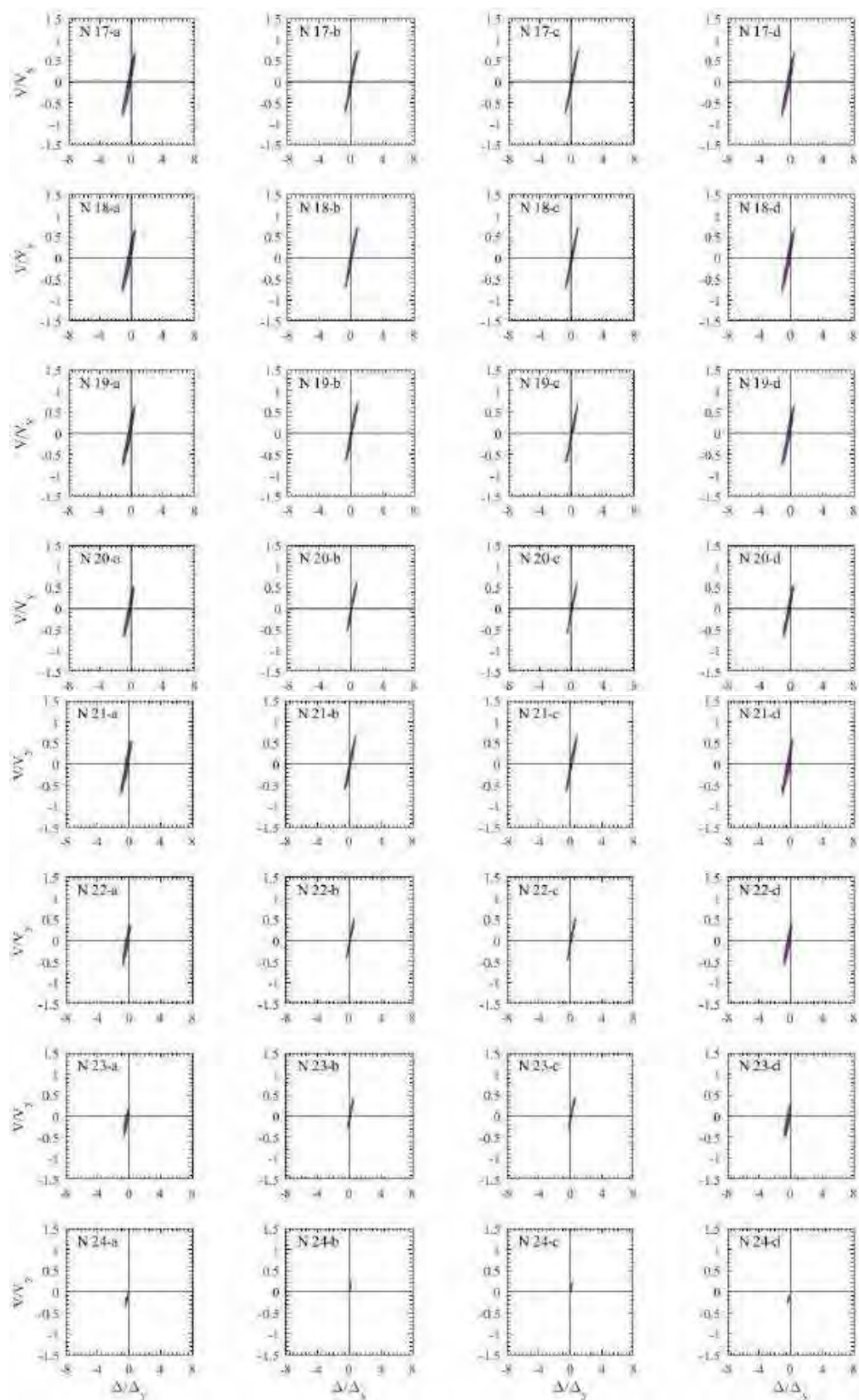
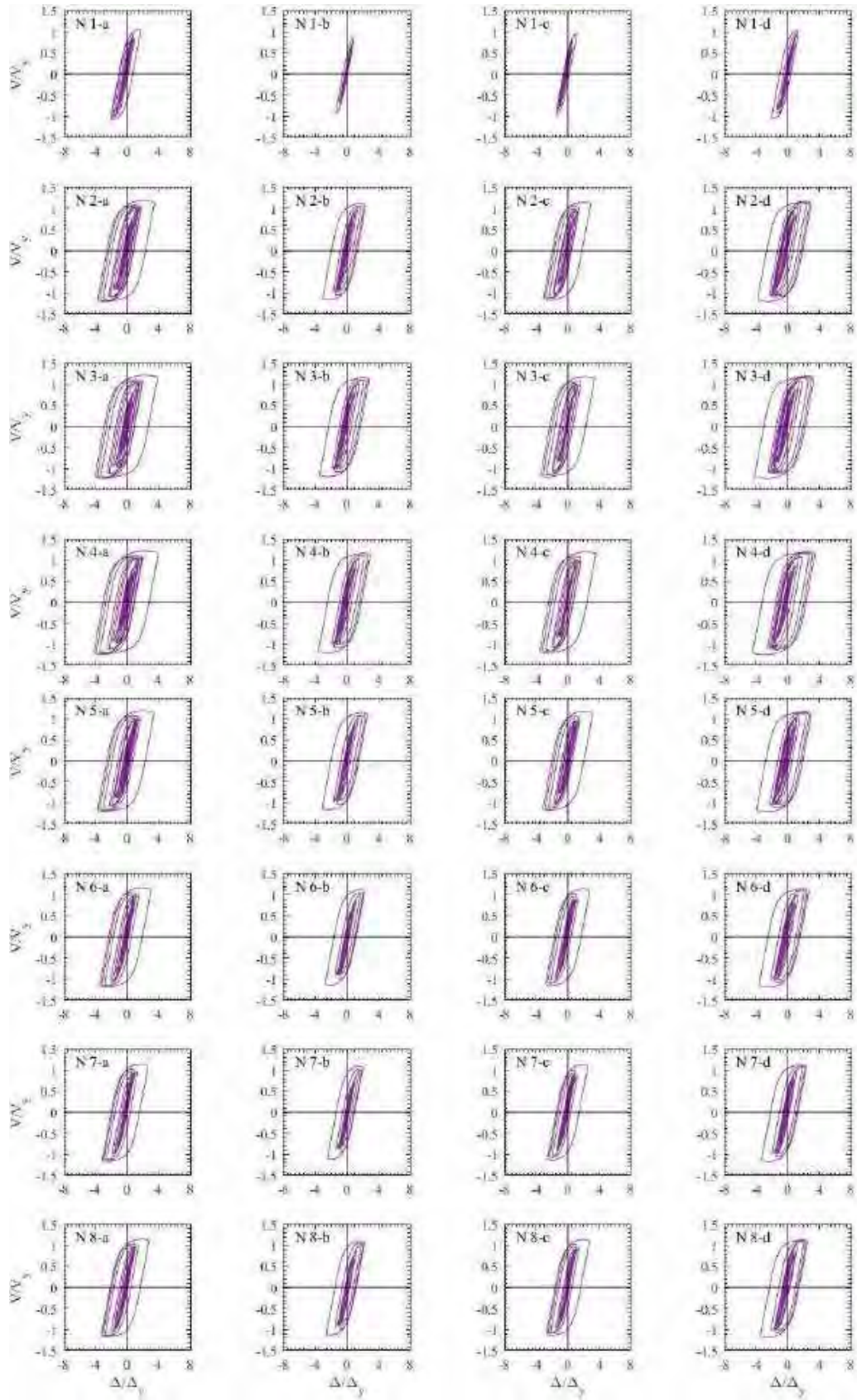
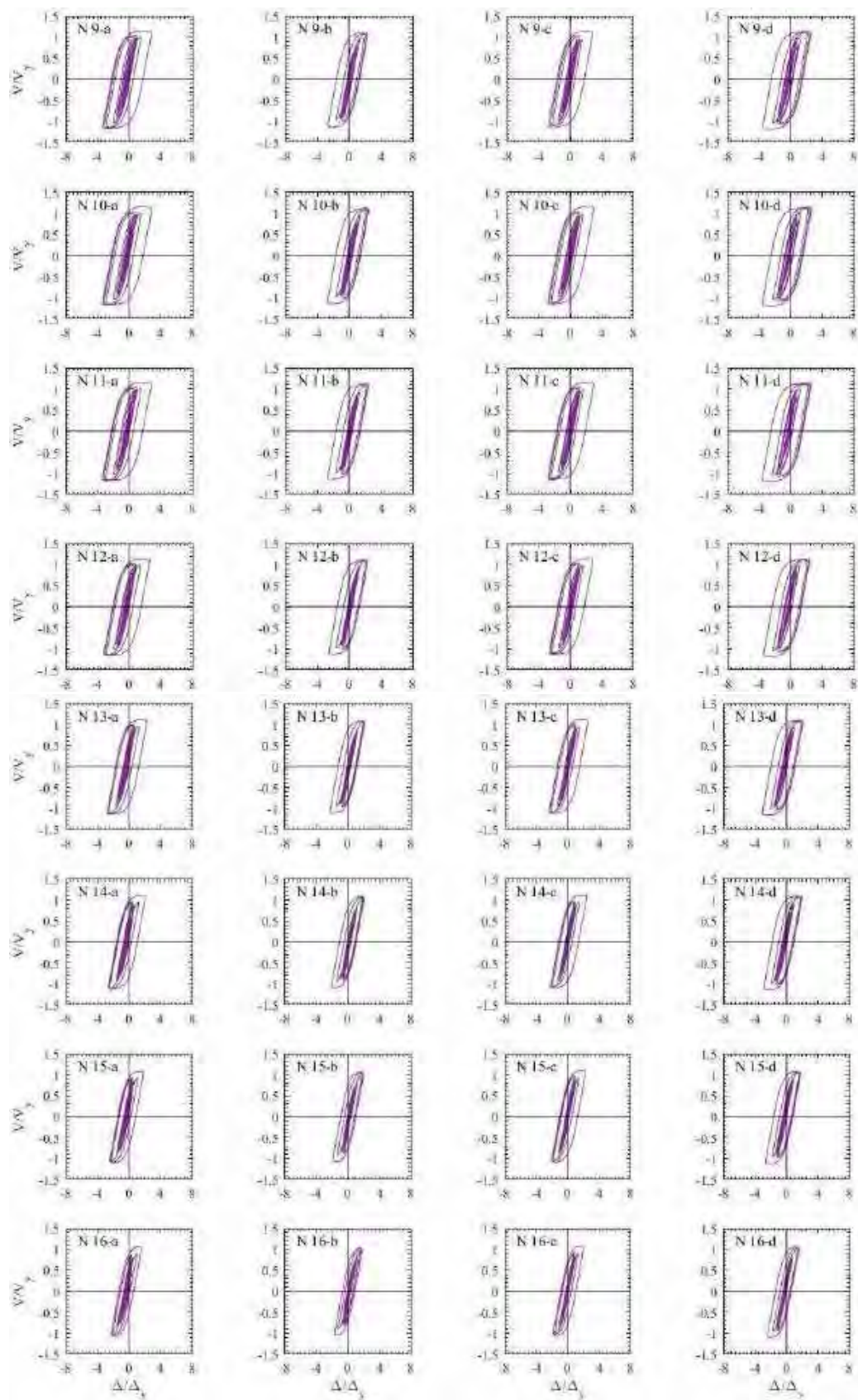


Figura H.25. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SCT185-A (1985)





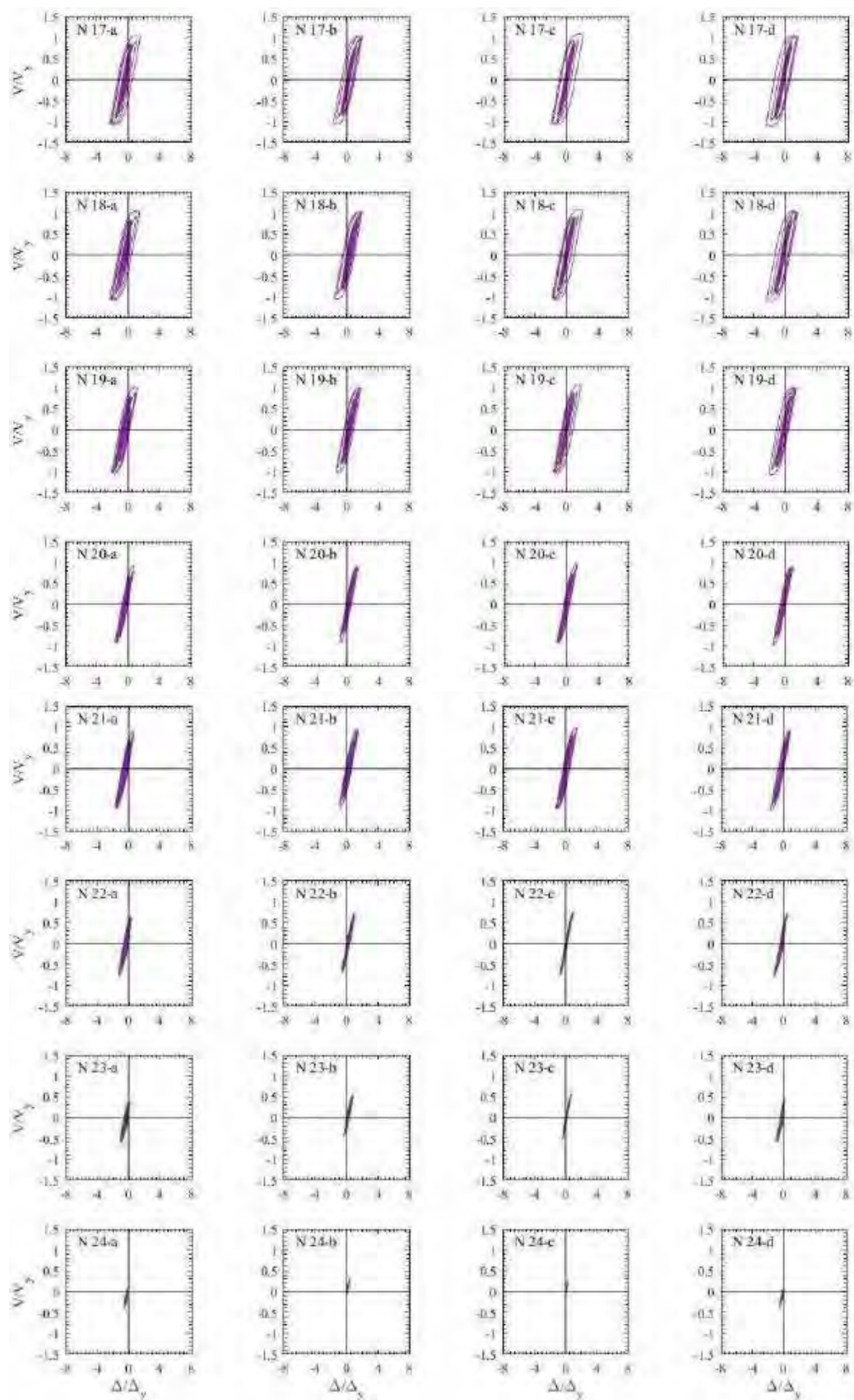
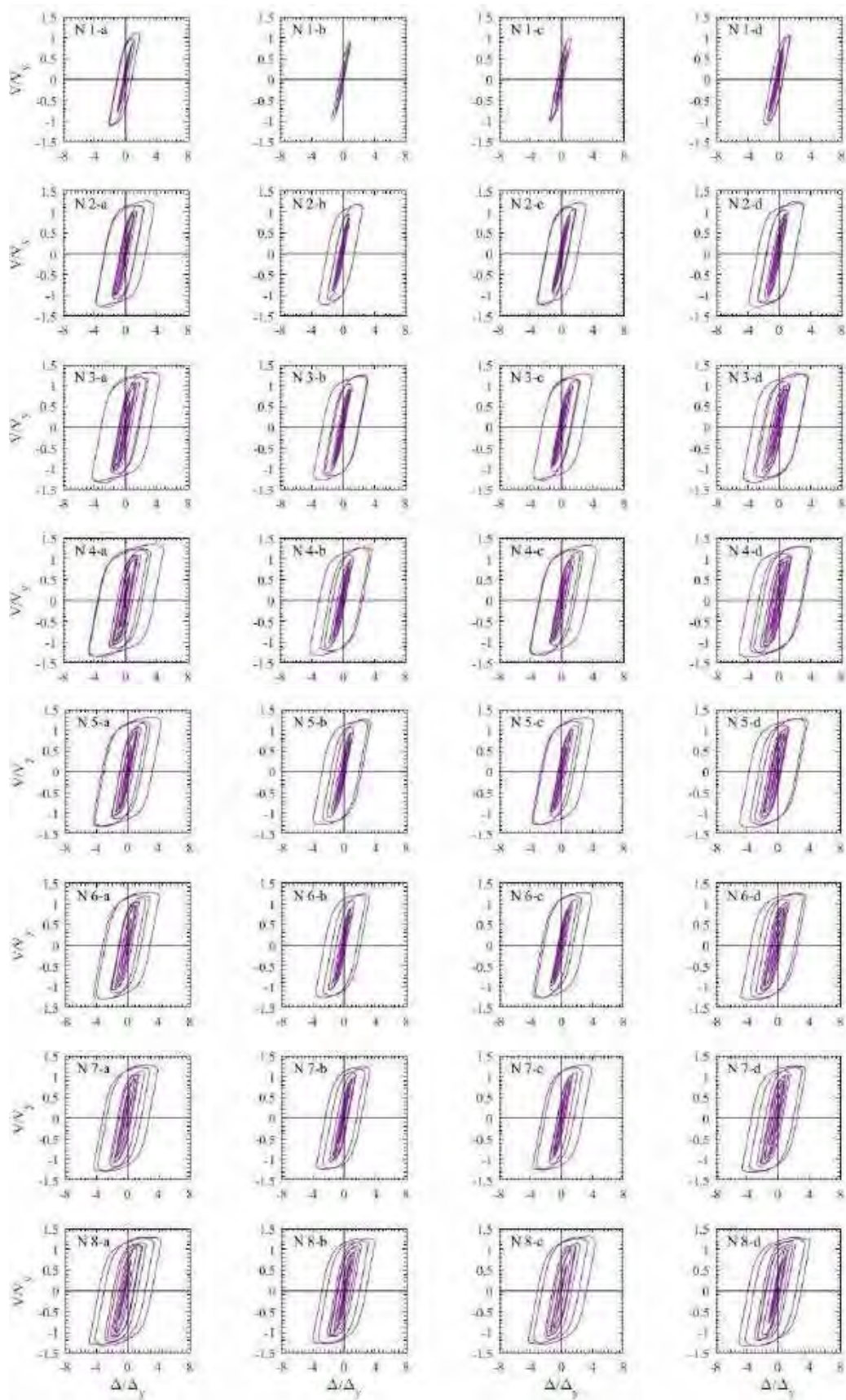
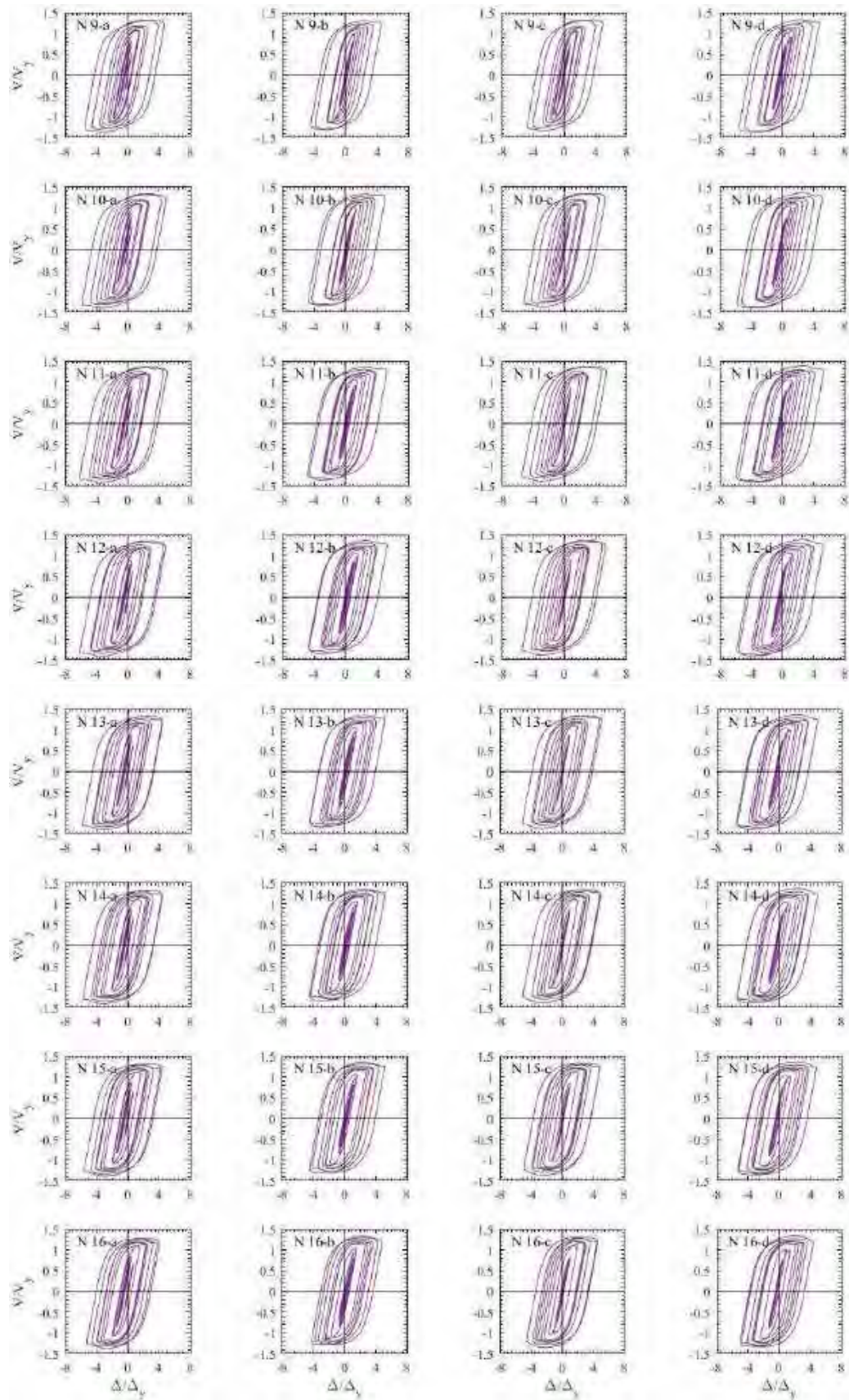


Figura H.26. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SCT185-B (1985)





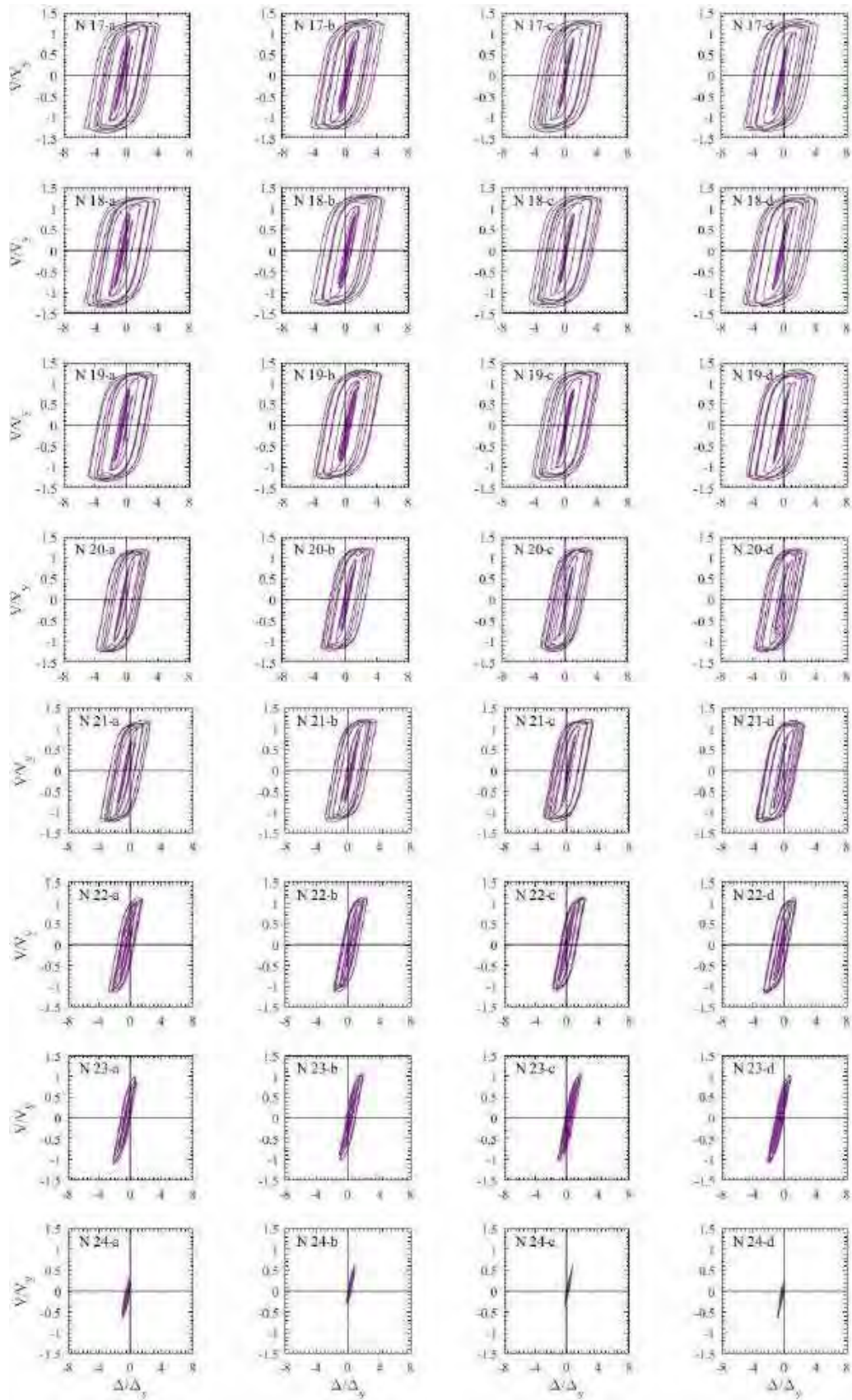
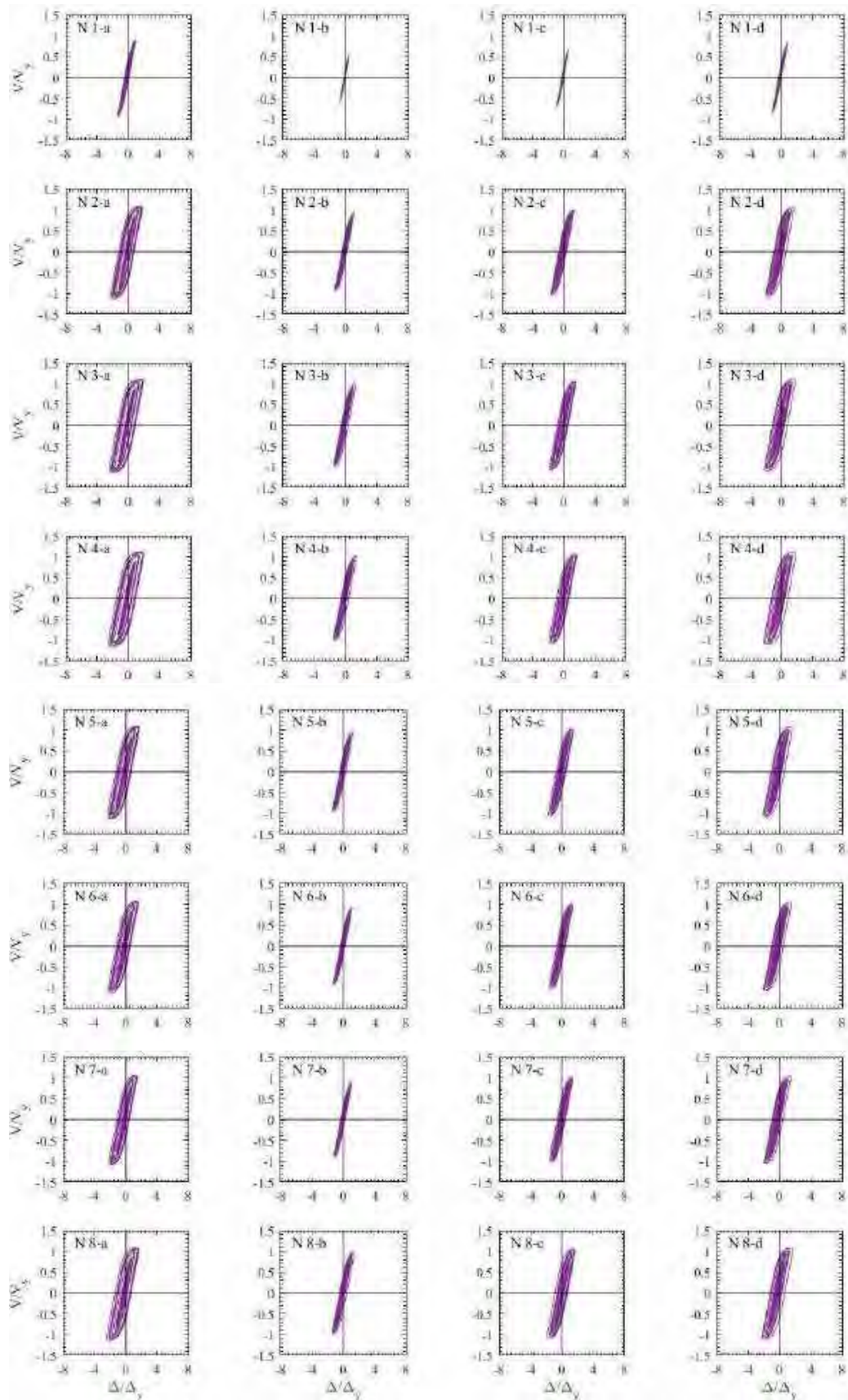
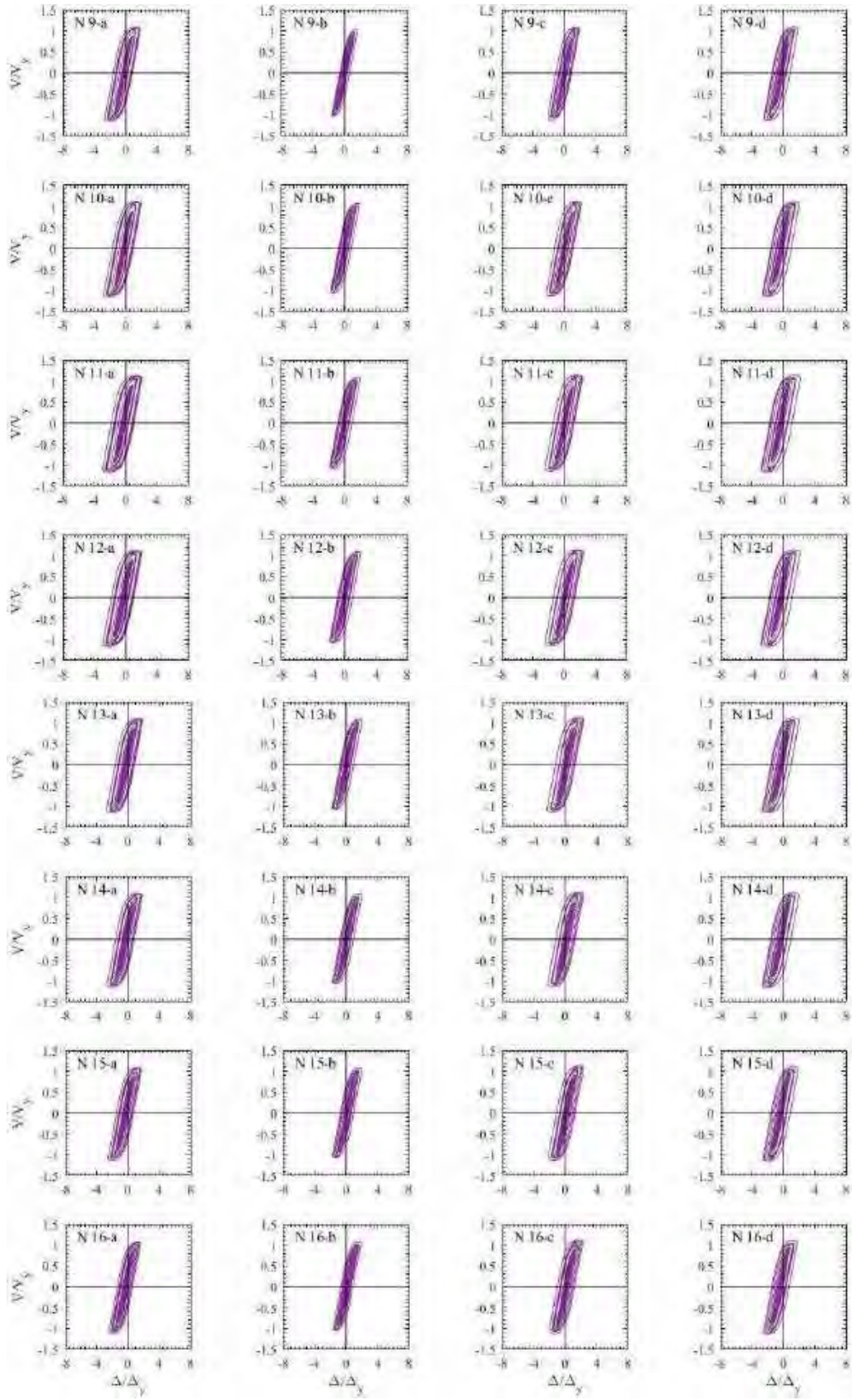


Figura H.27. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CH84-A (2017)





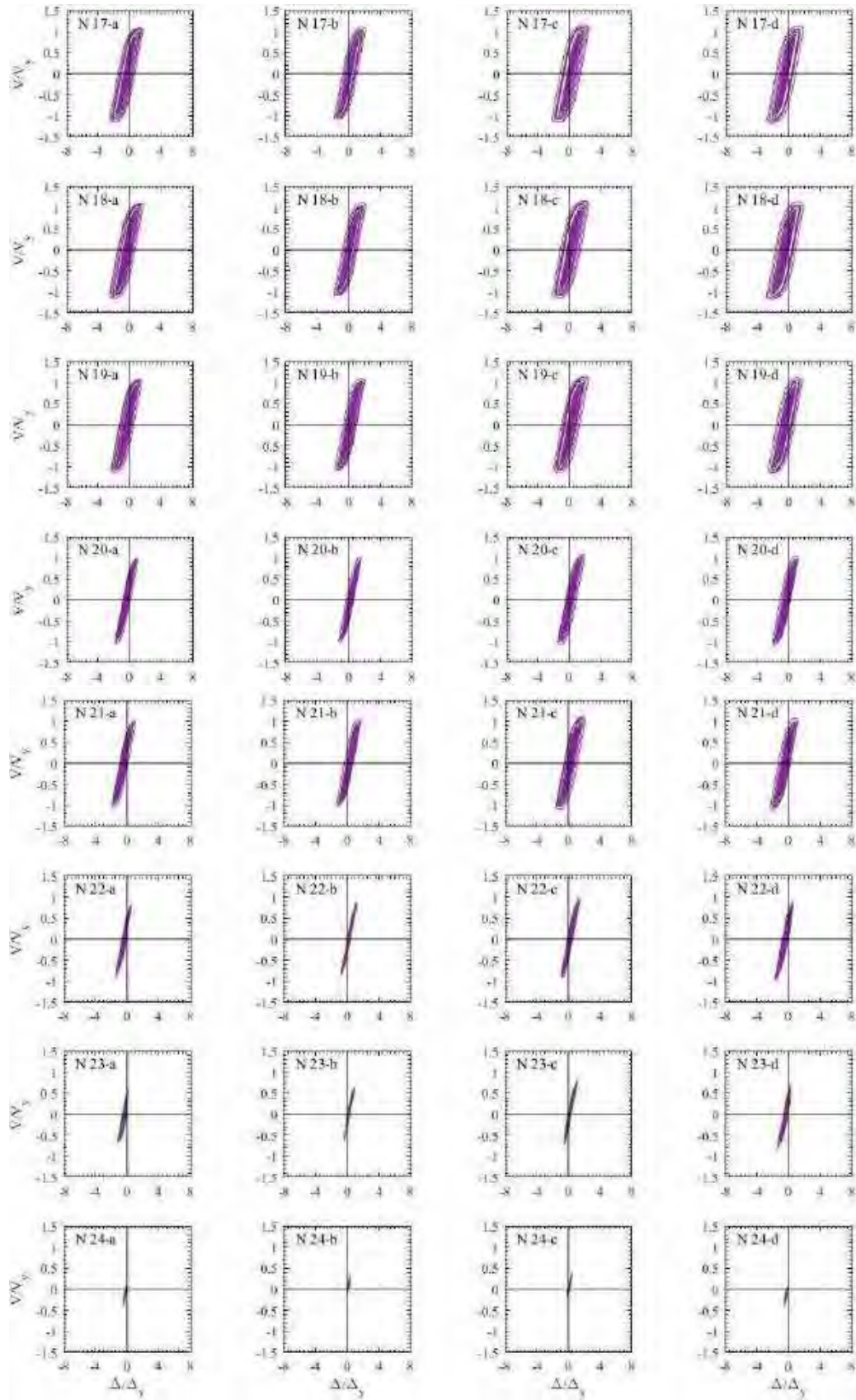
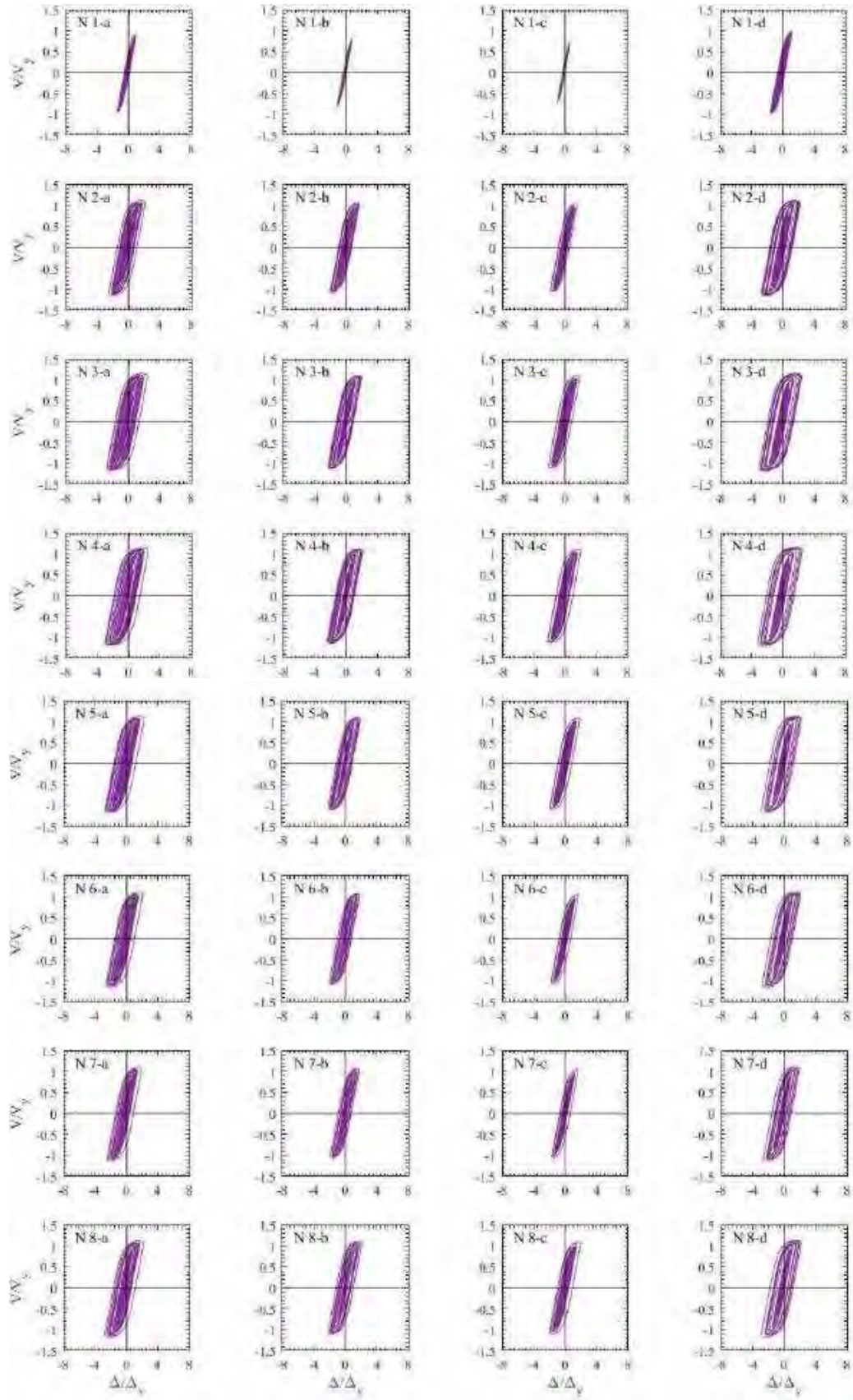
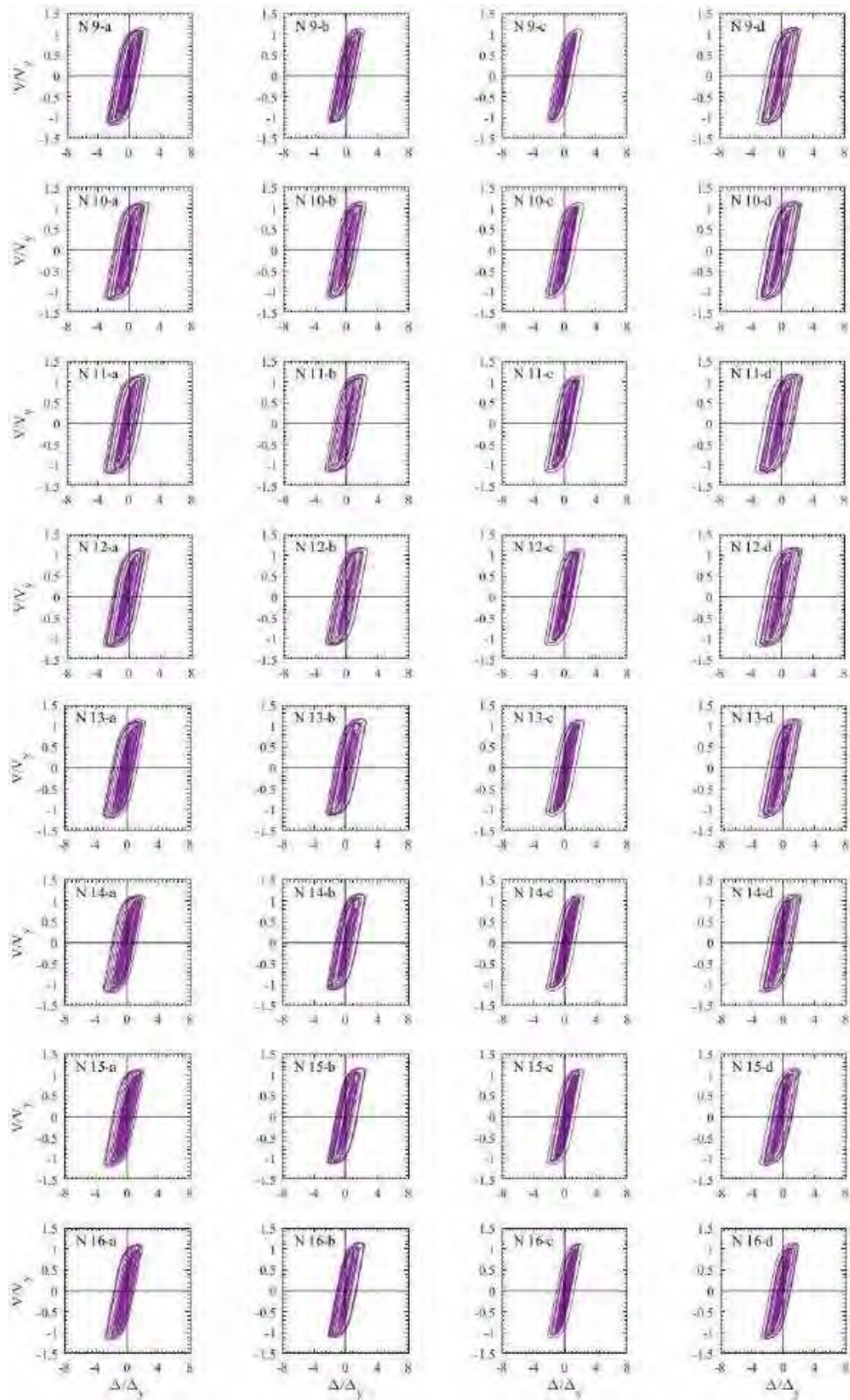


Figura H.28. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CH84-B (2017)





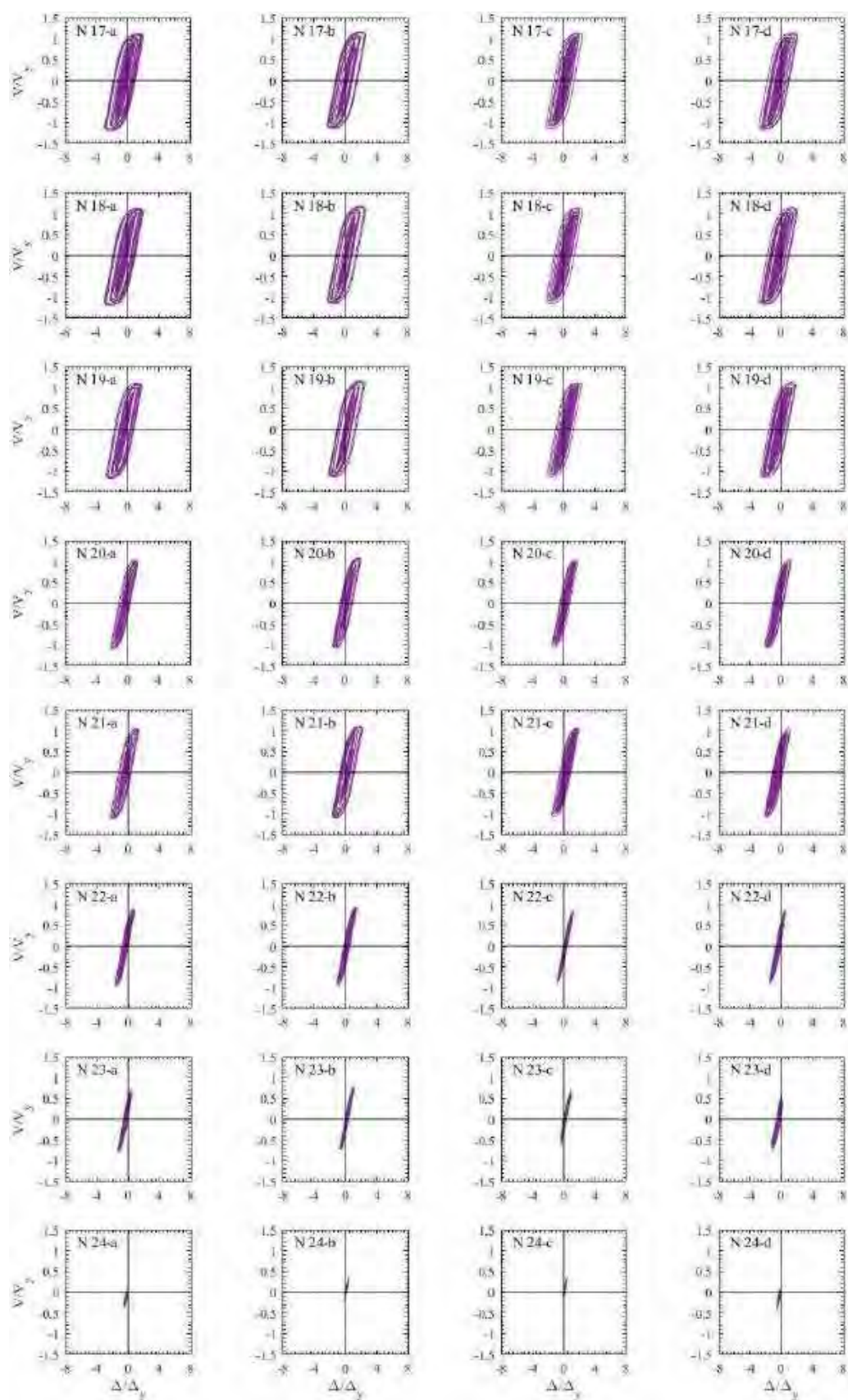
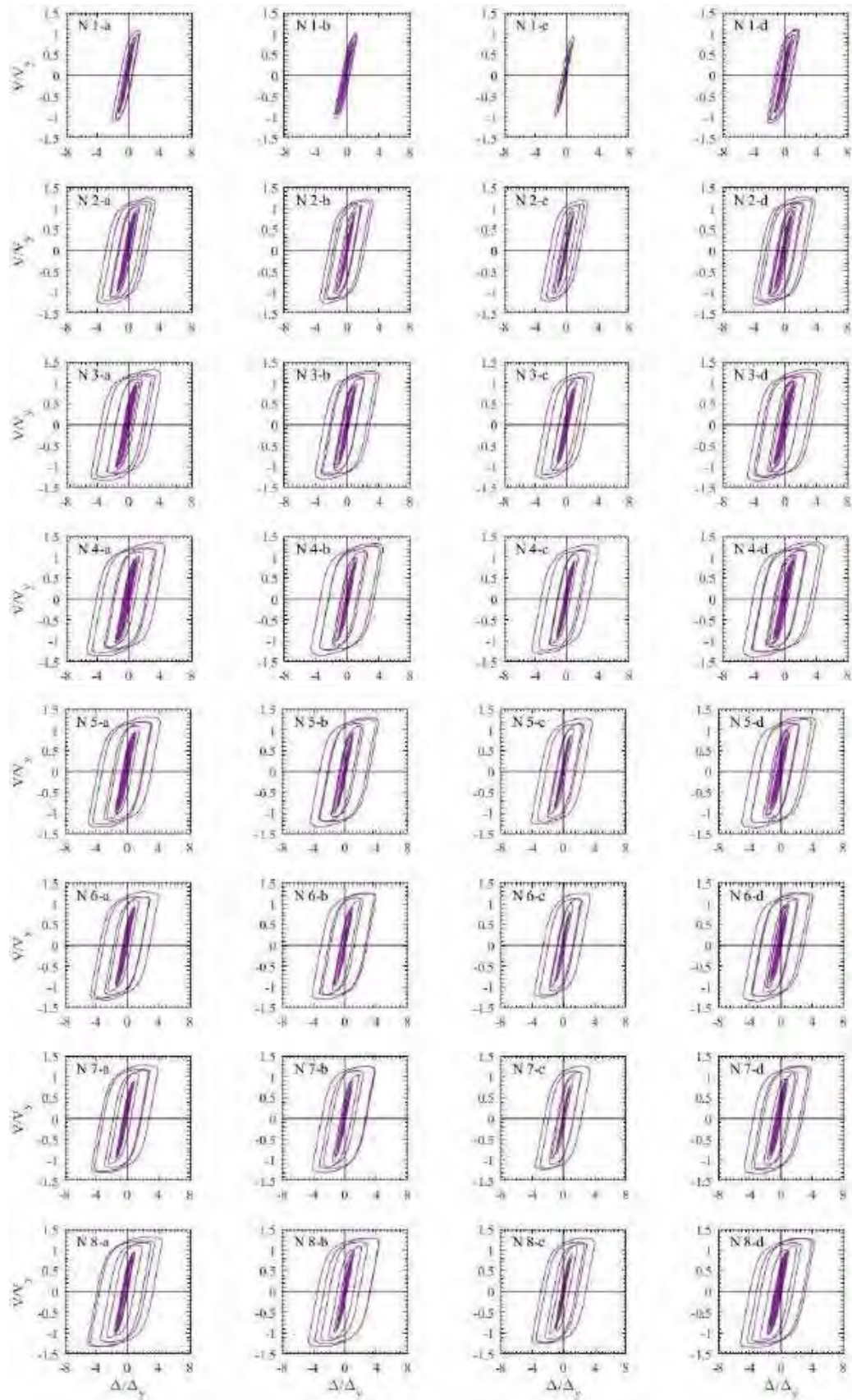
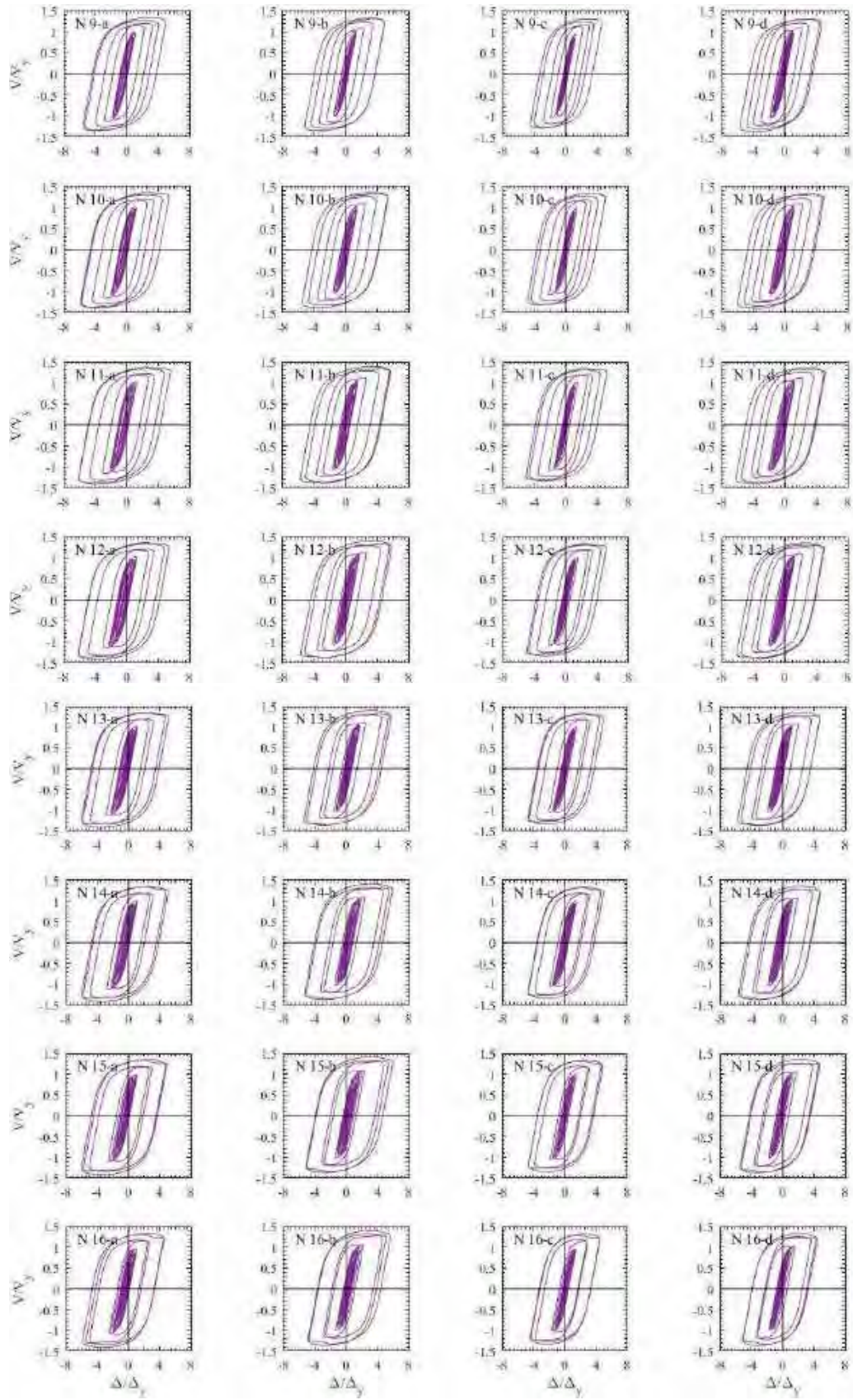


Figura H.29. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración MI15-A (2017)





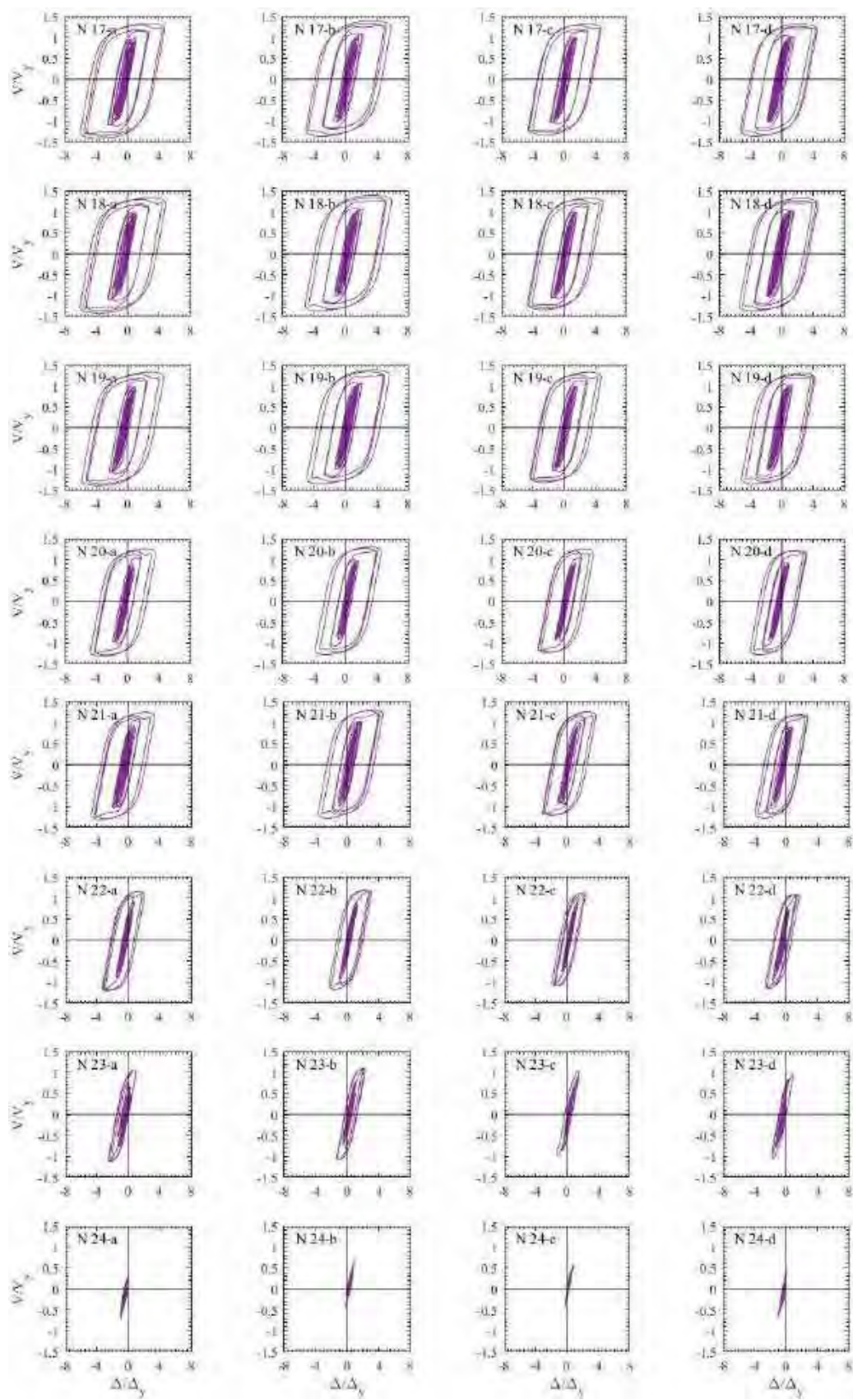
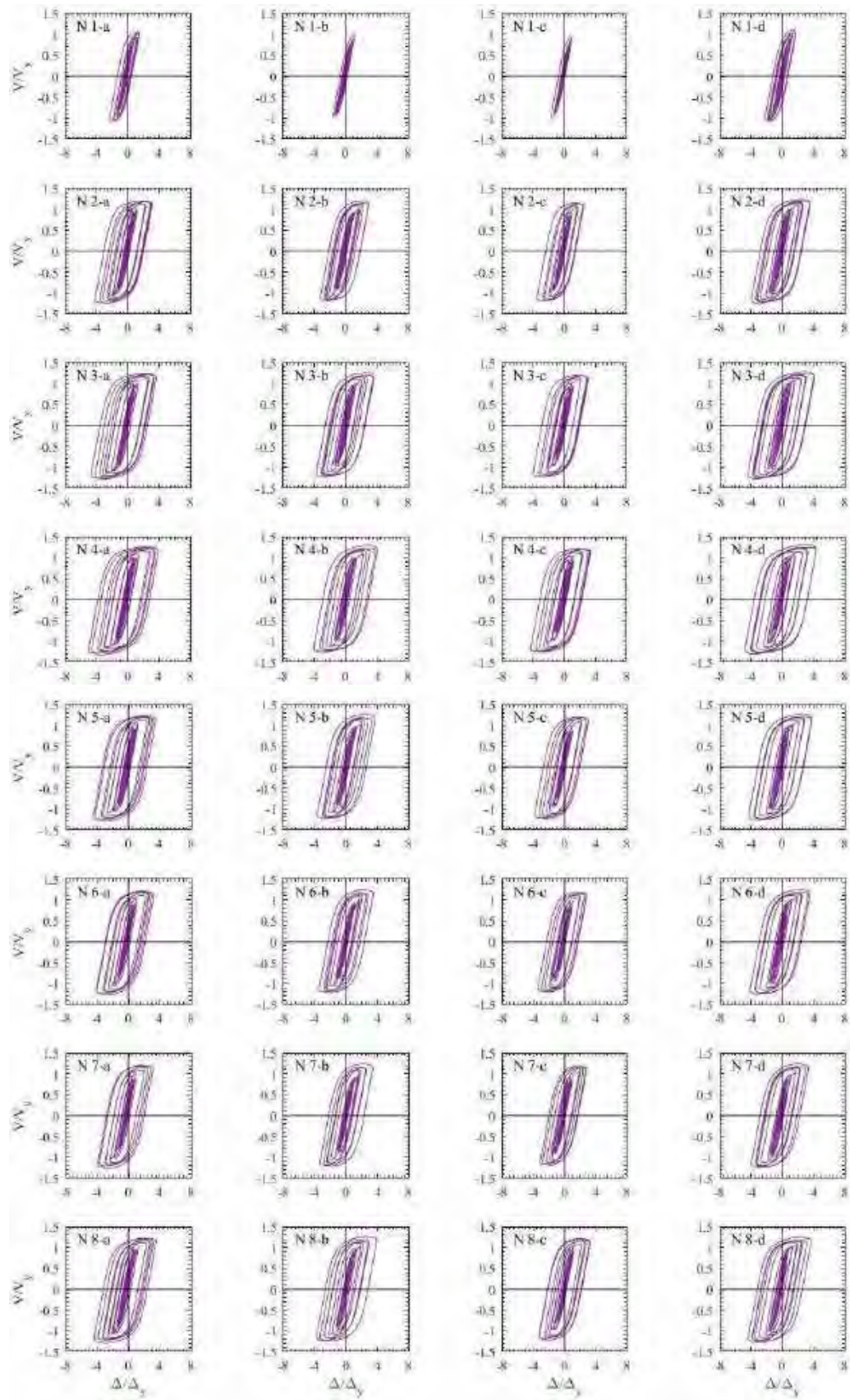
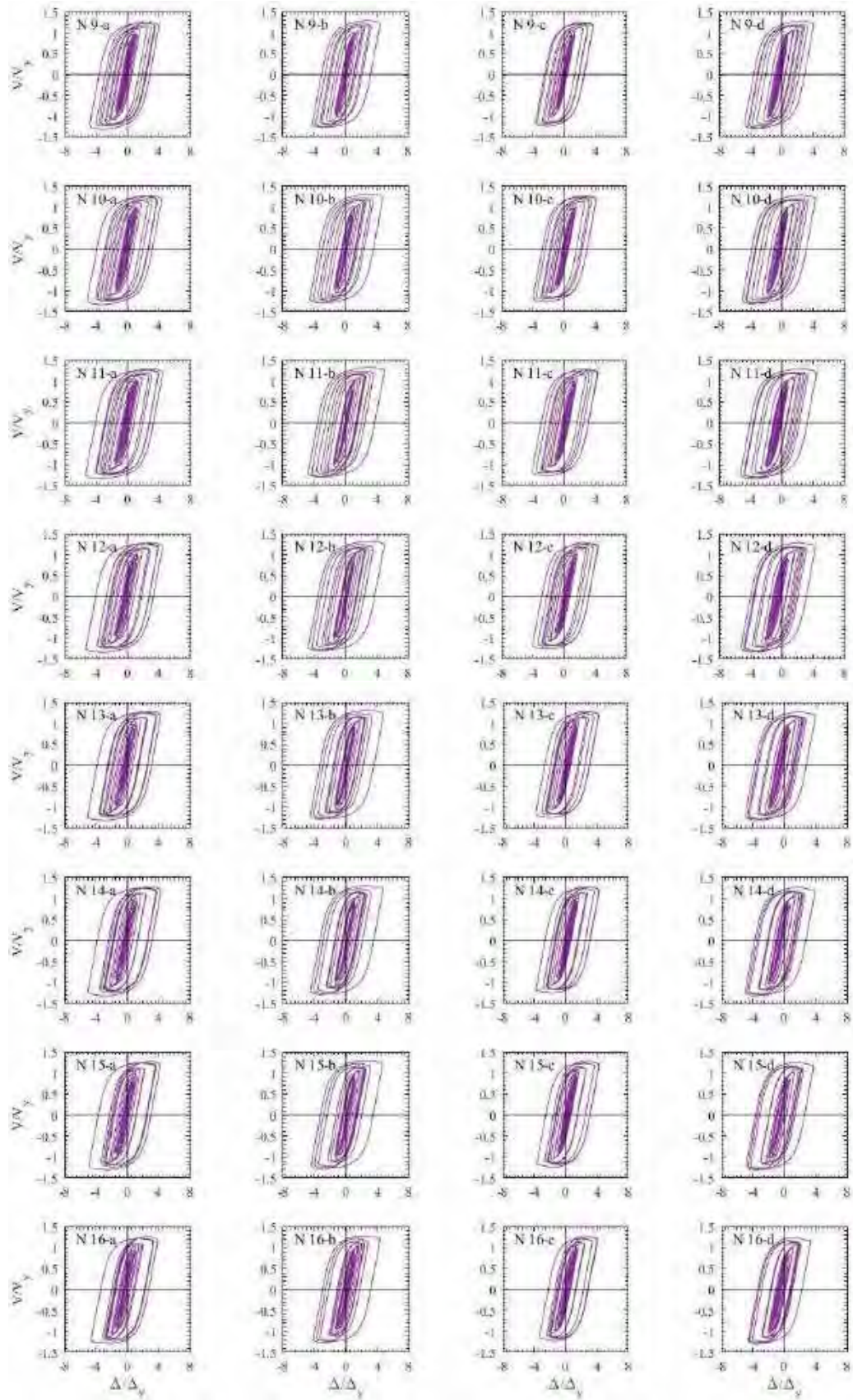


Figura H.30. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración MI15-B (2017)





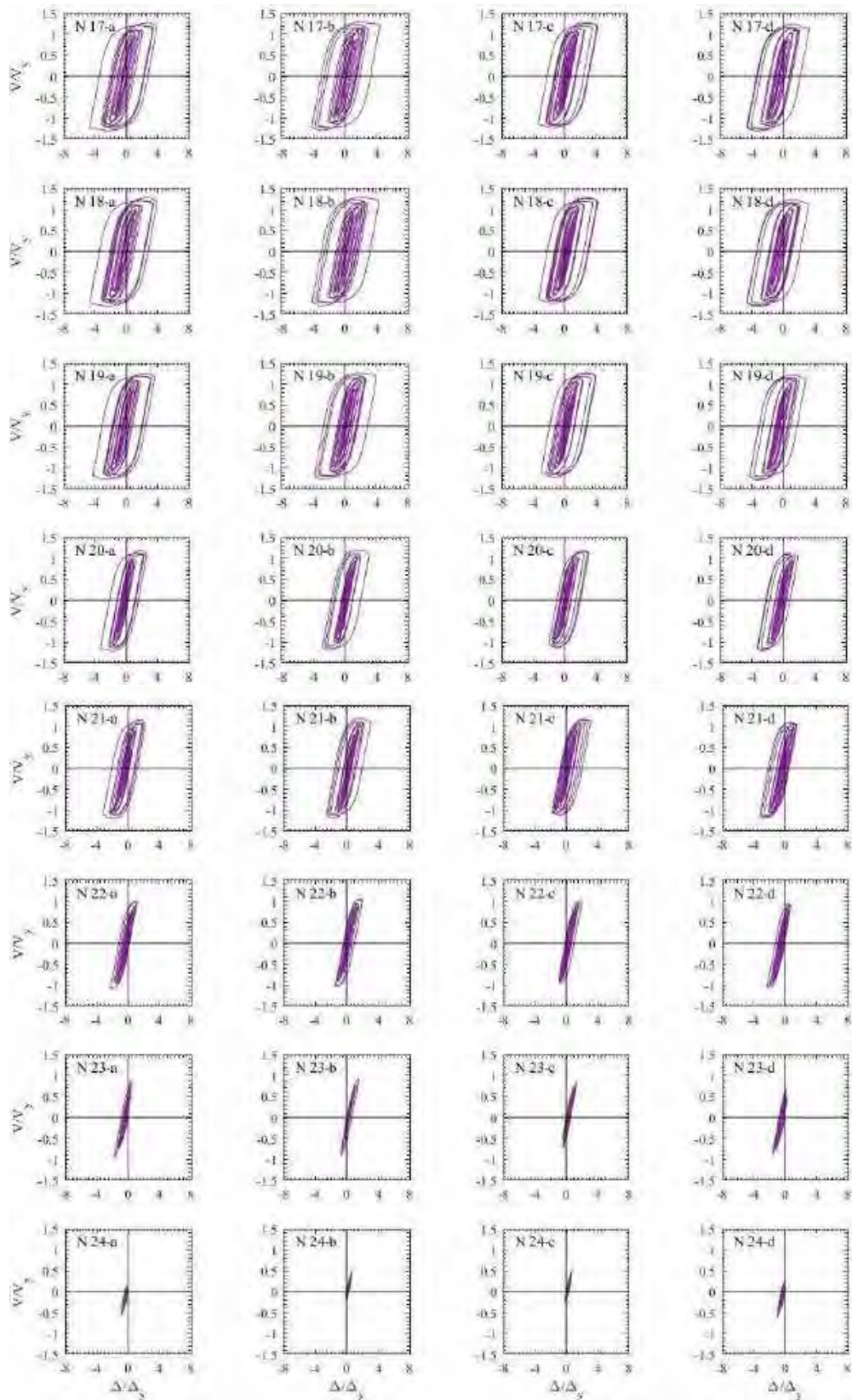
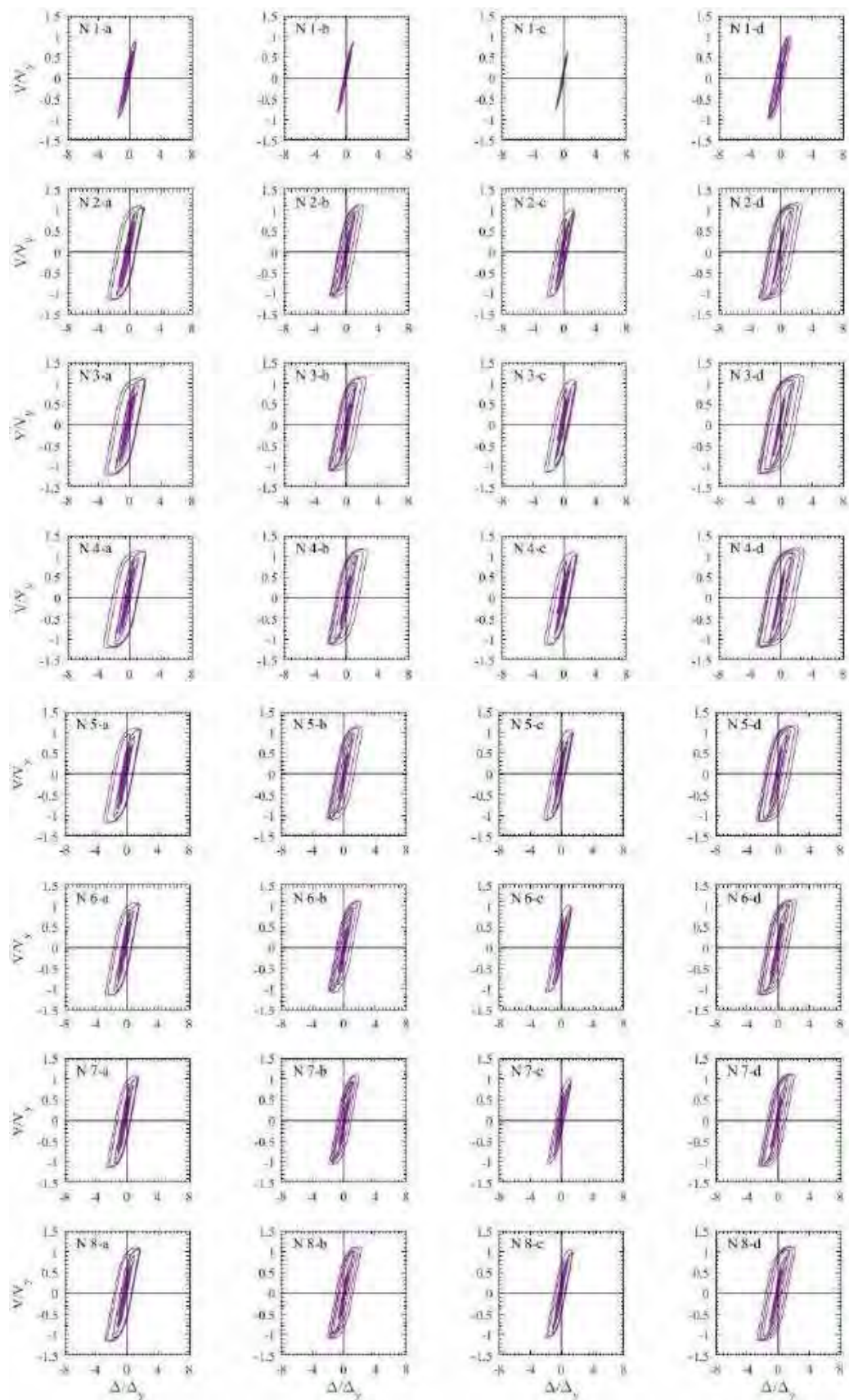
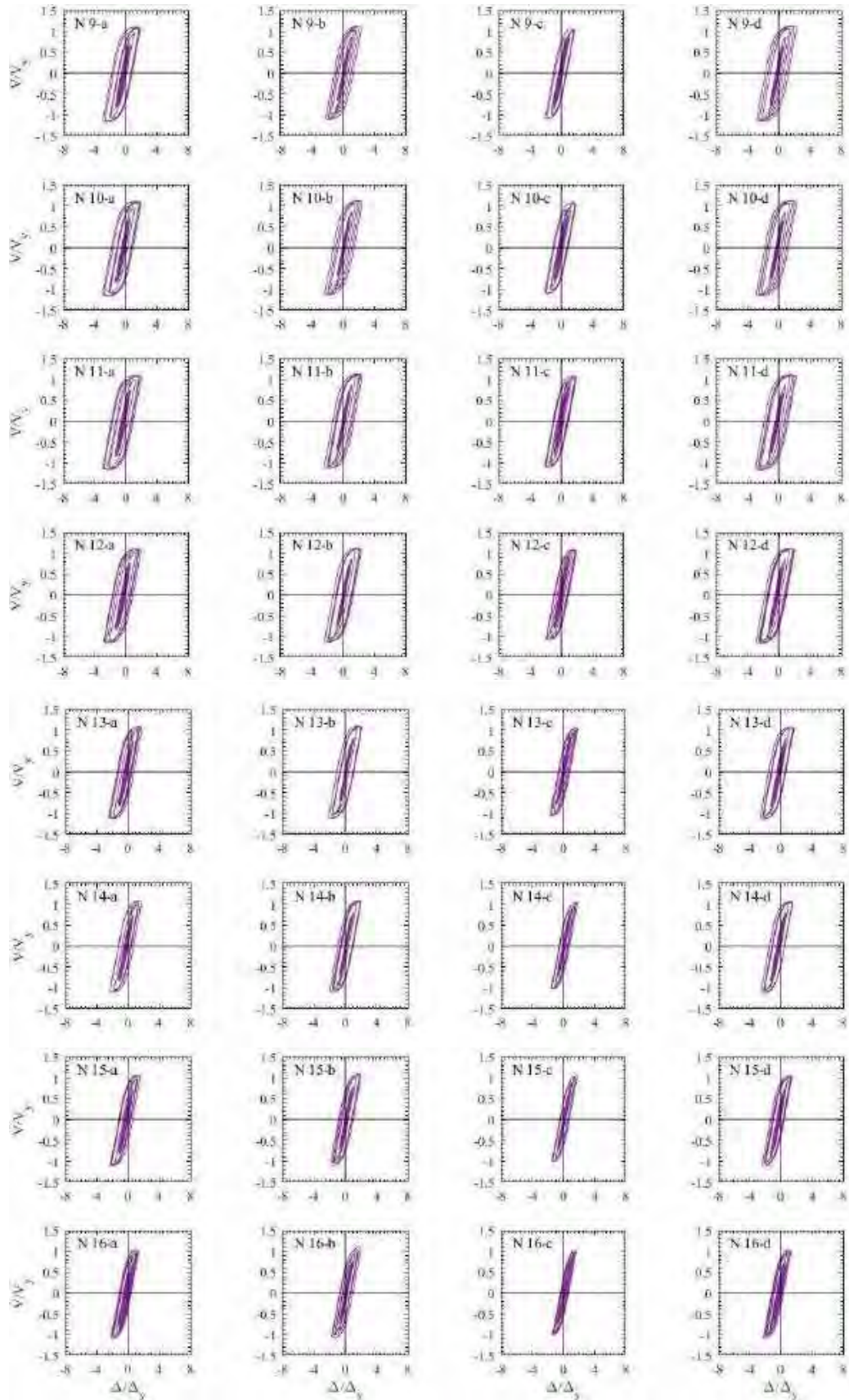


Figura H.31. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración XO36-A (2017)





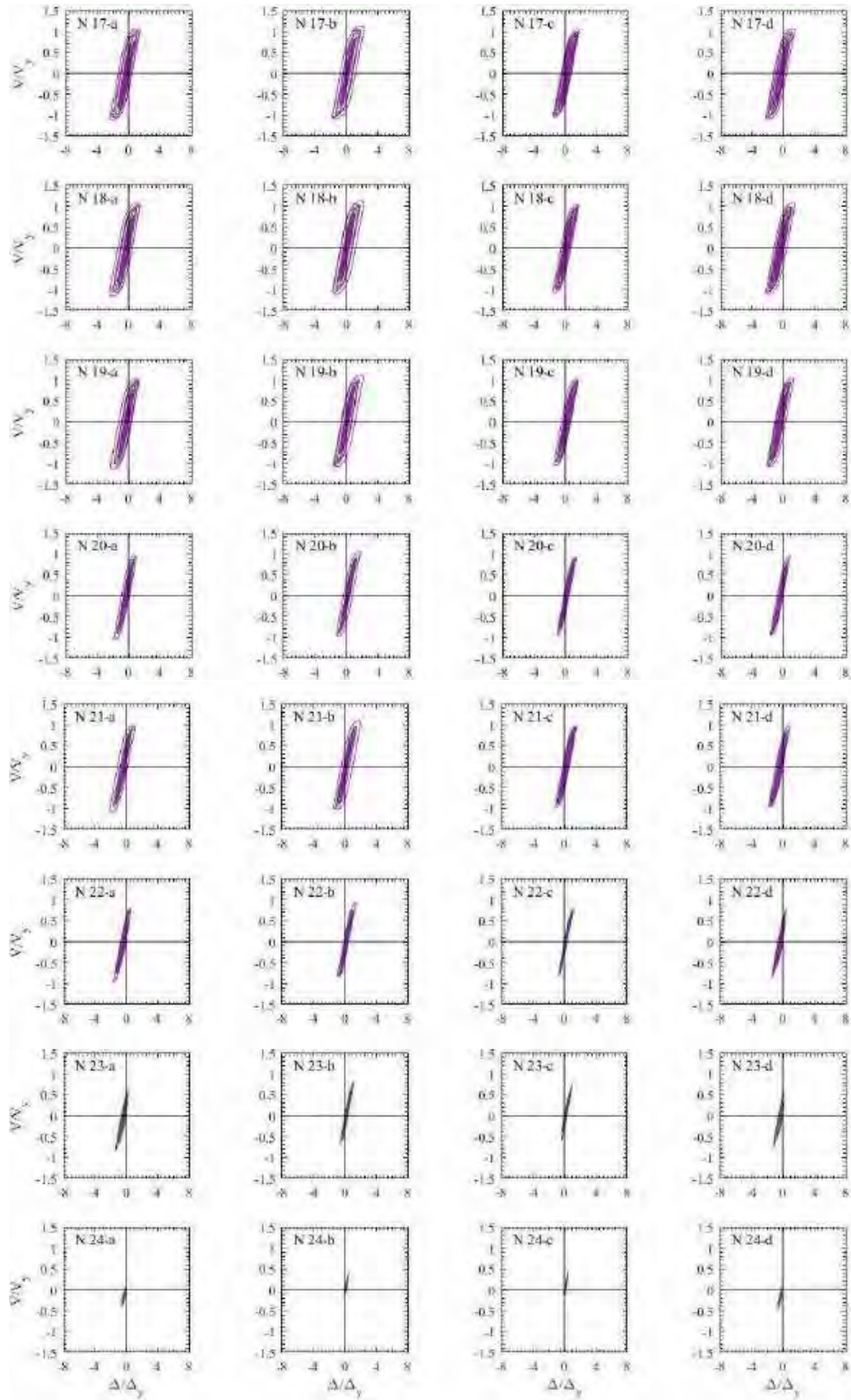
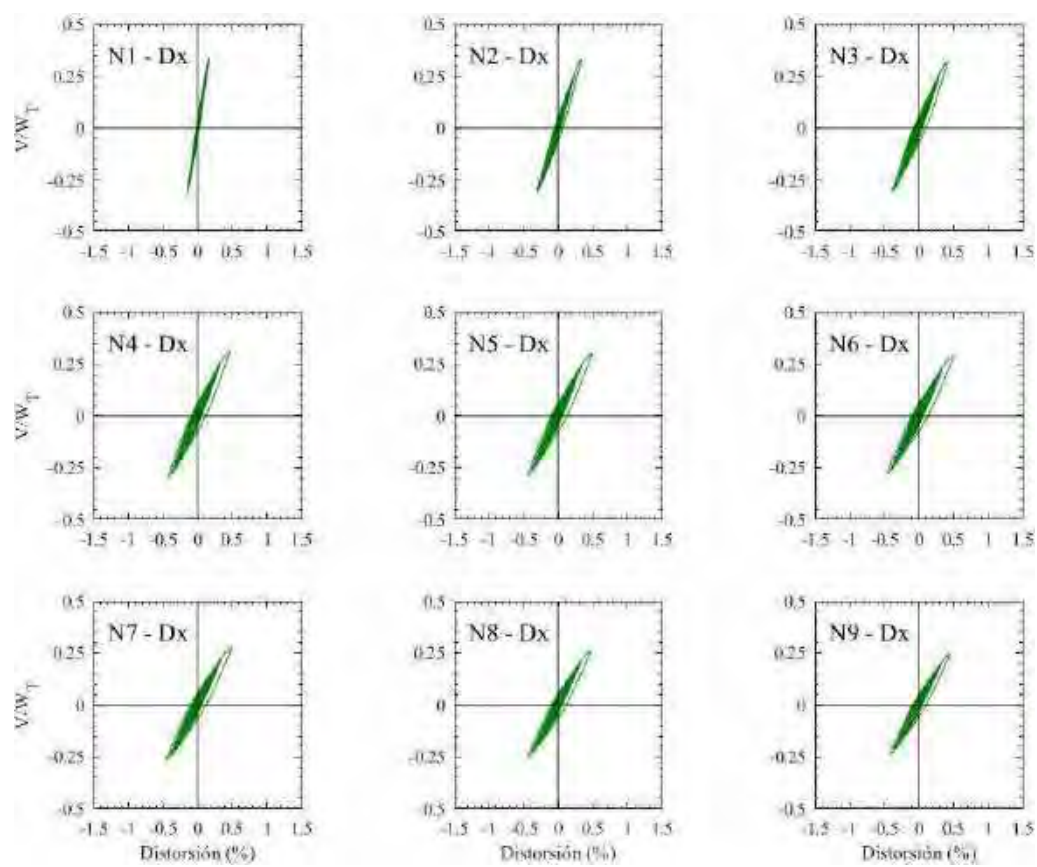


Figura H.32. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.1.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x



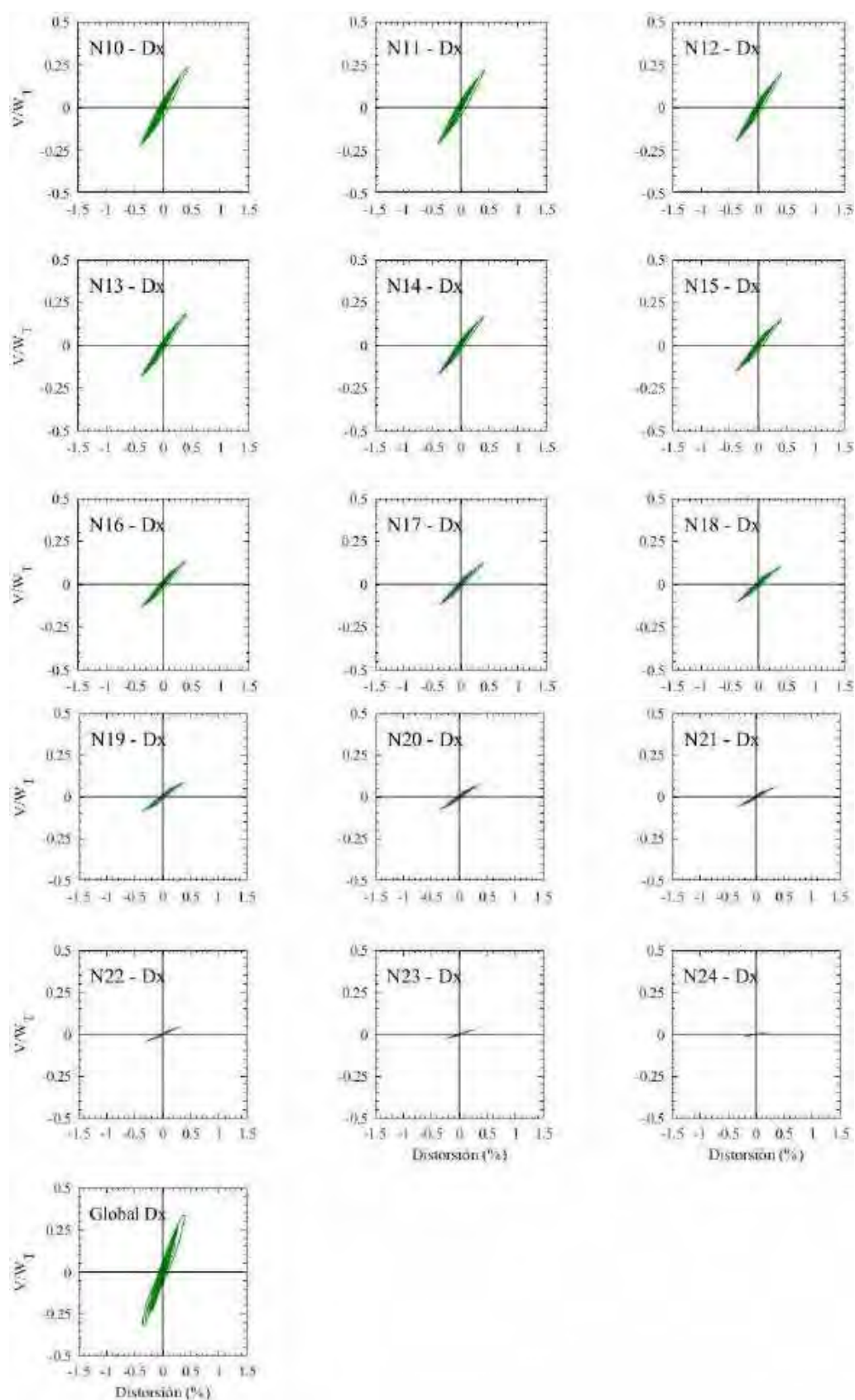
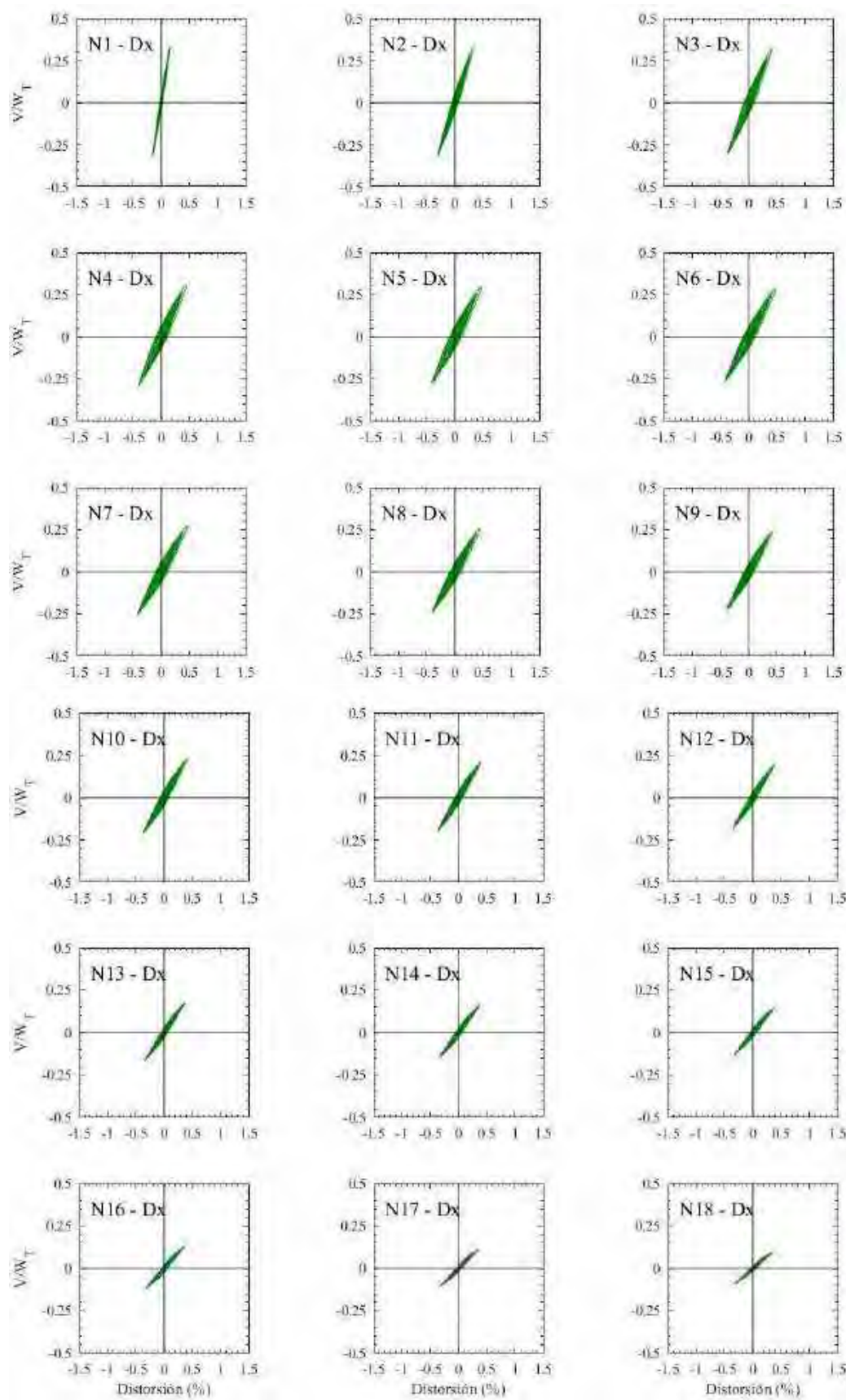


Figura H.33. Ciclos de histéresis de los entrapisos en dirección x, registros de aceleración TL08-A



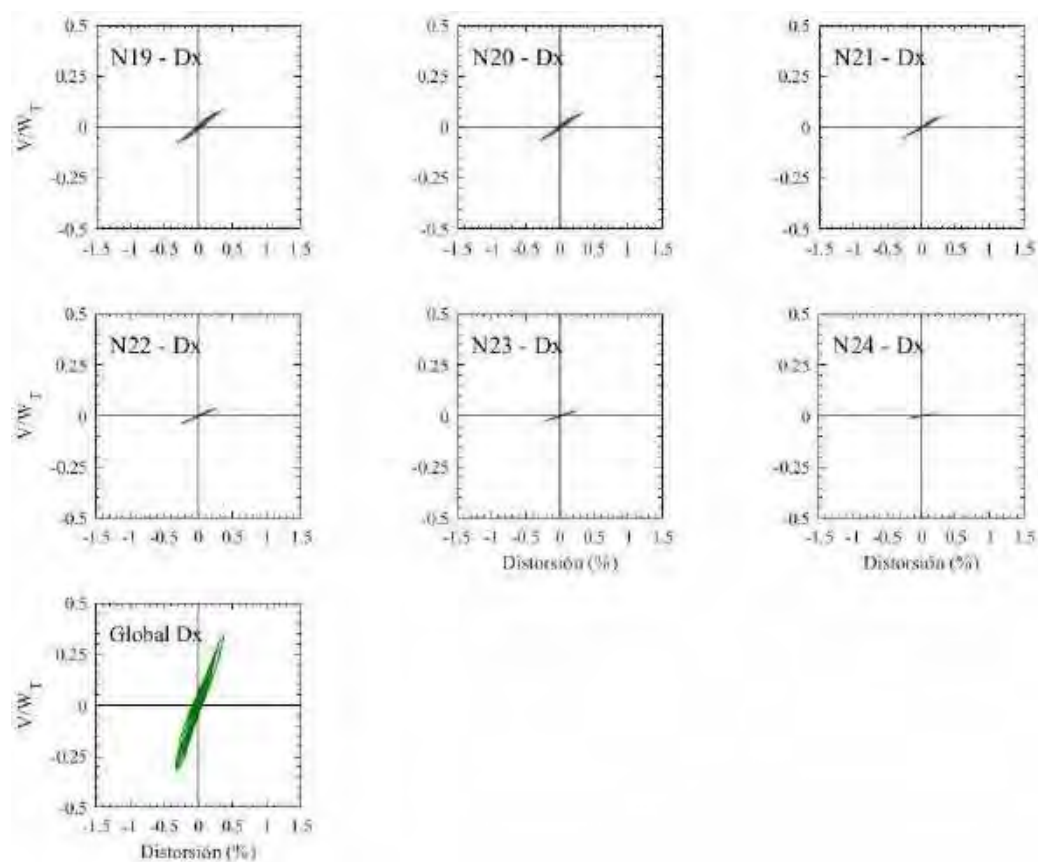
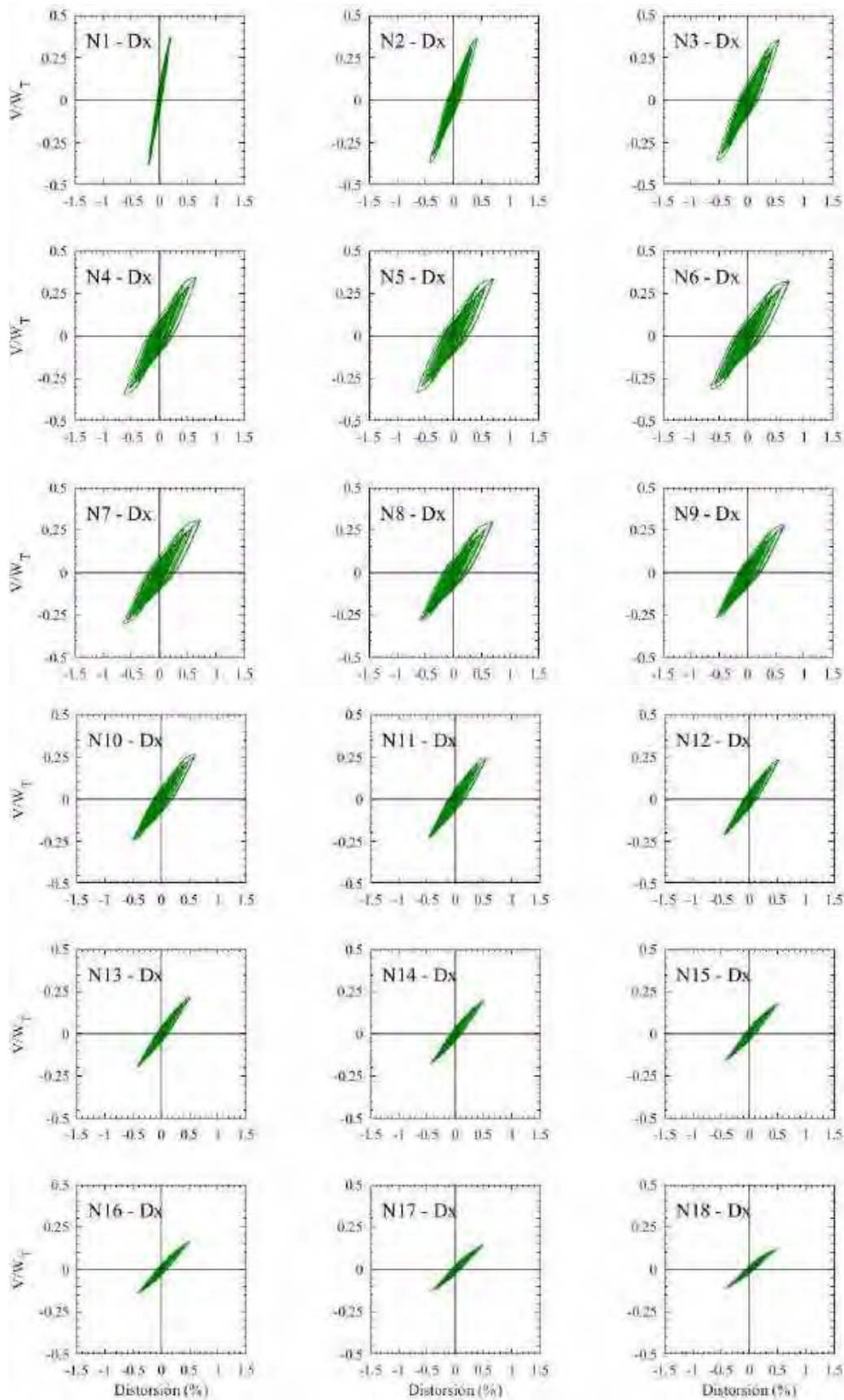


Figura H.34. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración TL08-B



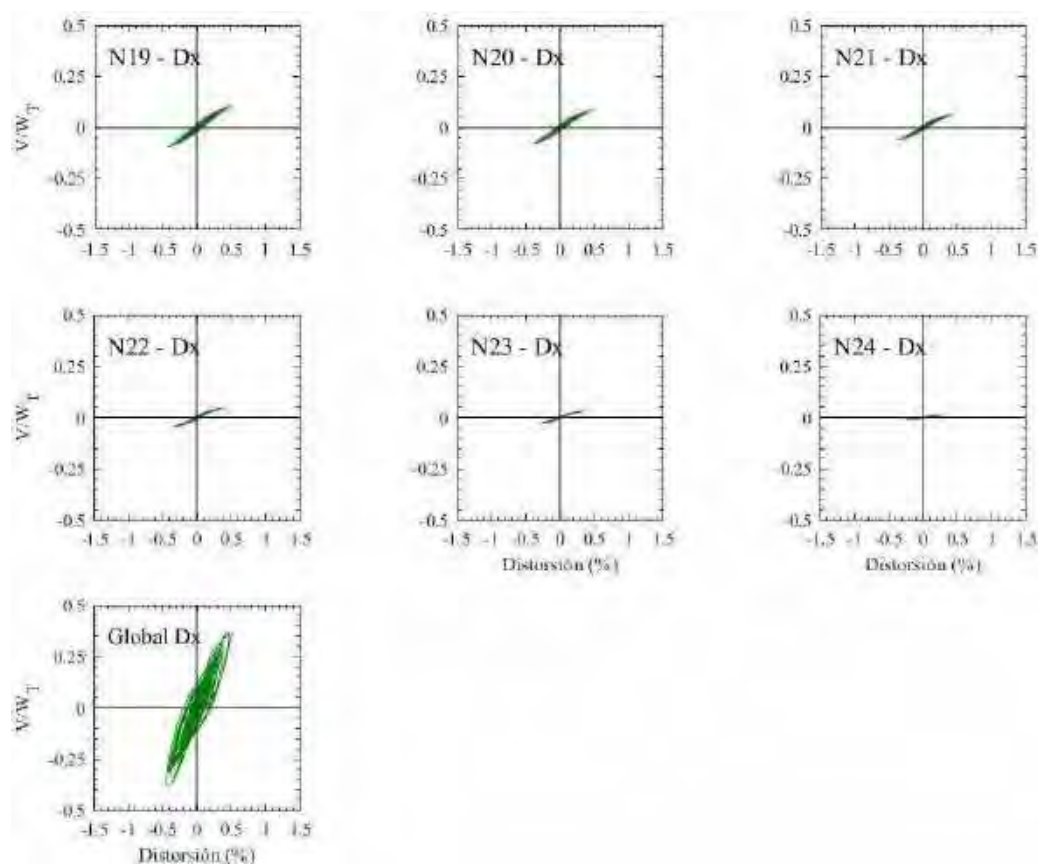
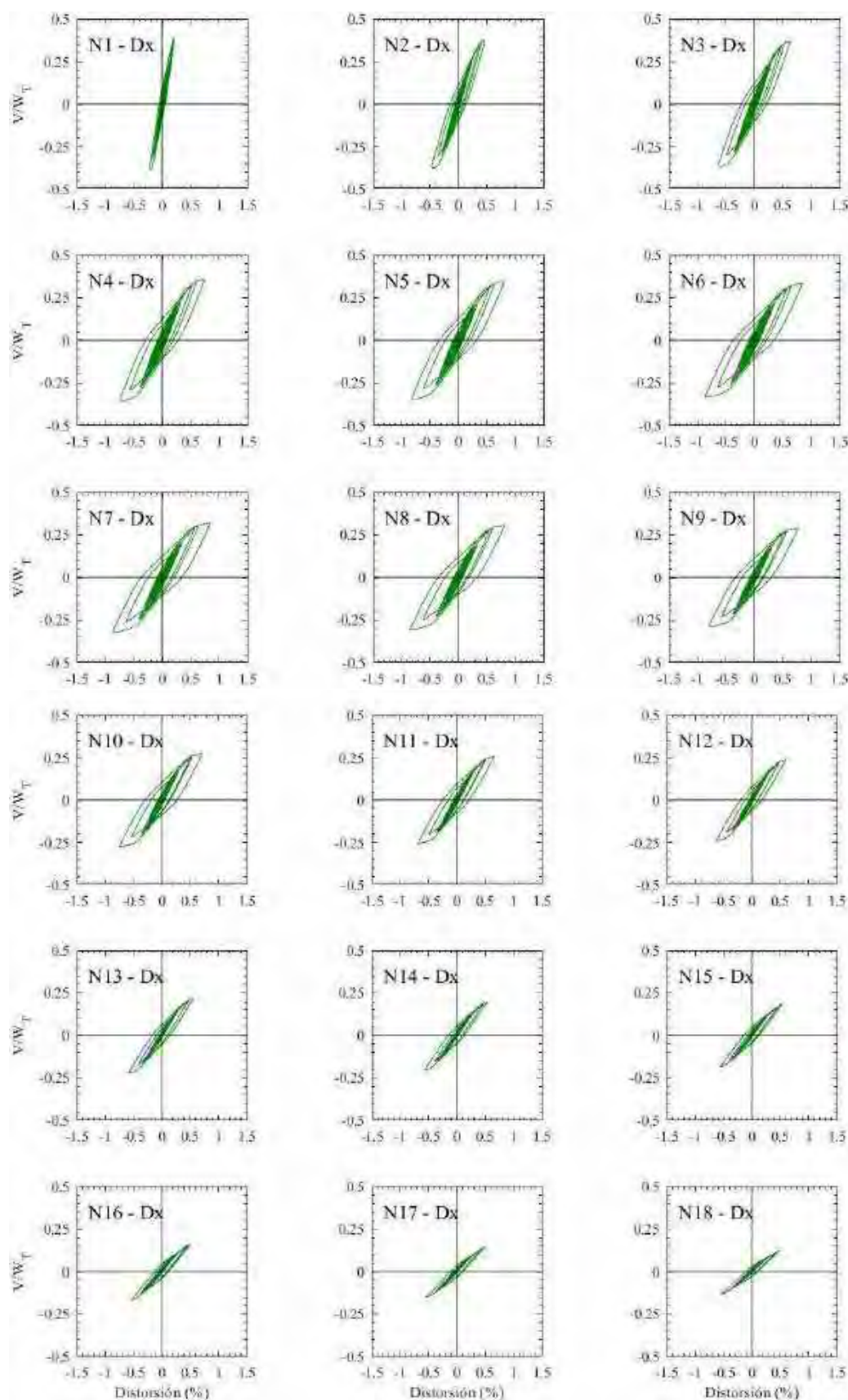


Figura H.35. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración CJ03-A



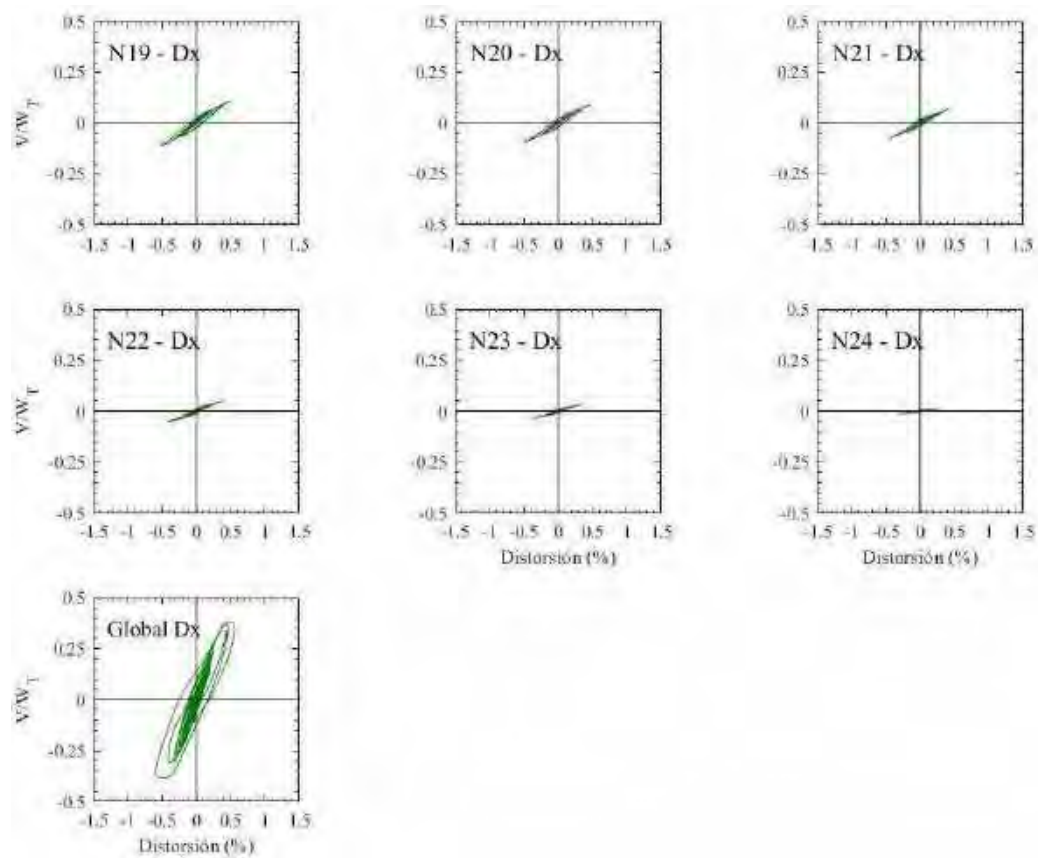
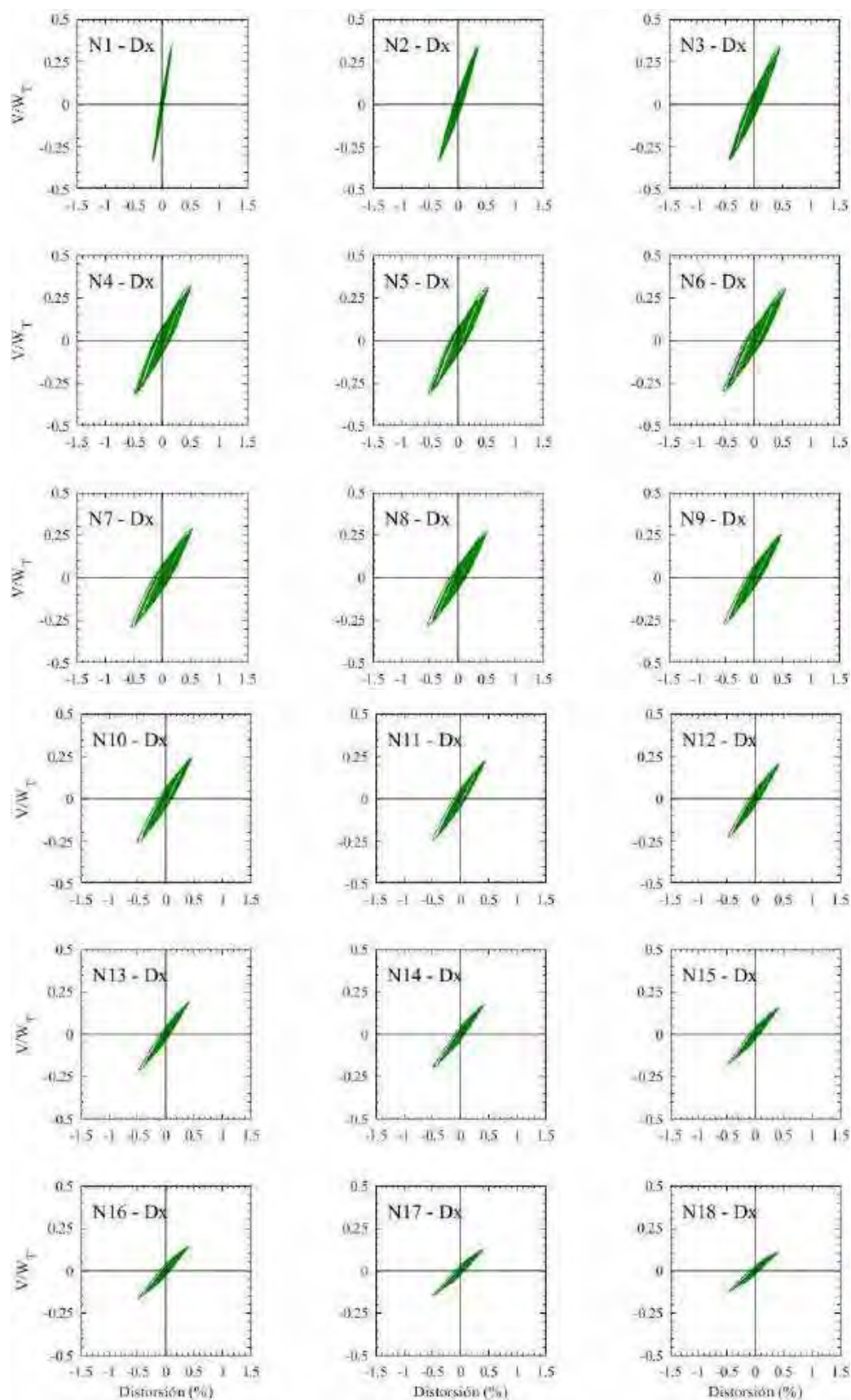


Figura H.36. Ciclos de histéresis de los entropisos en dirección x , registros de aceleración CJ03-B



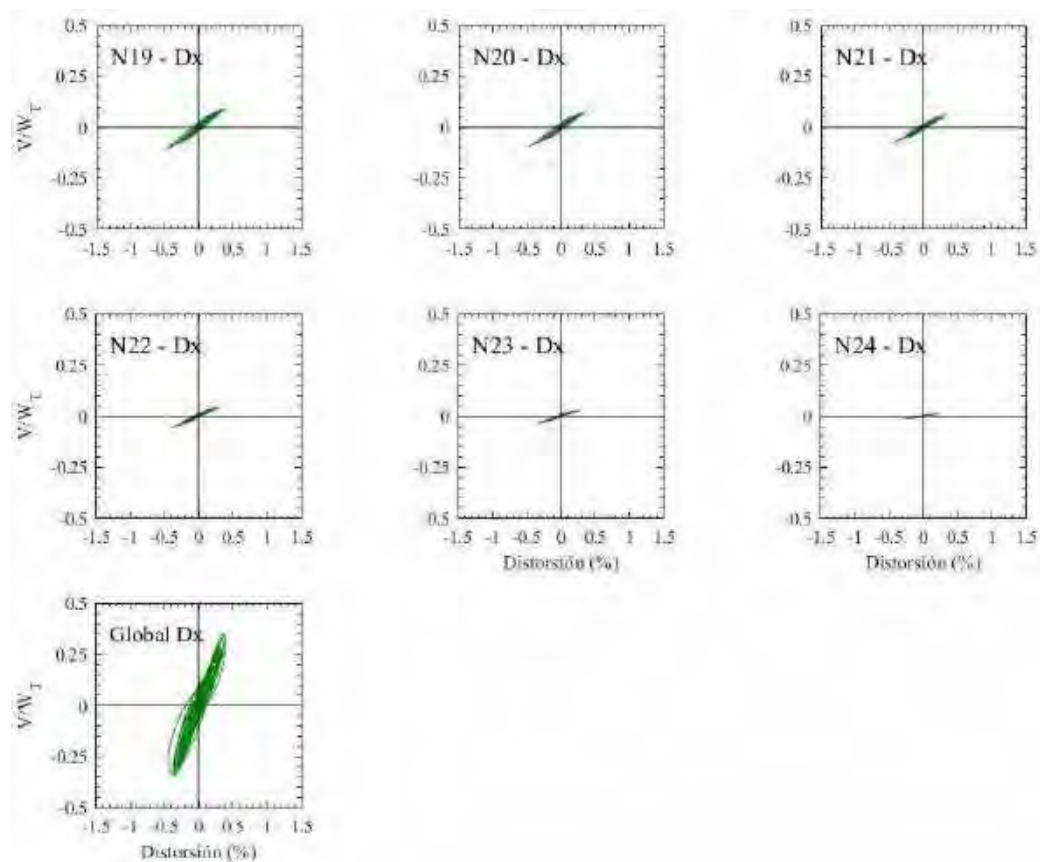
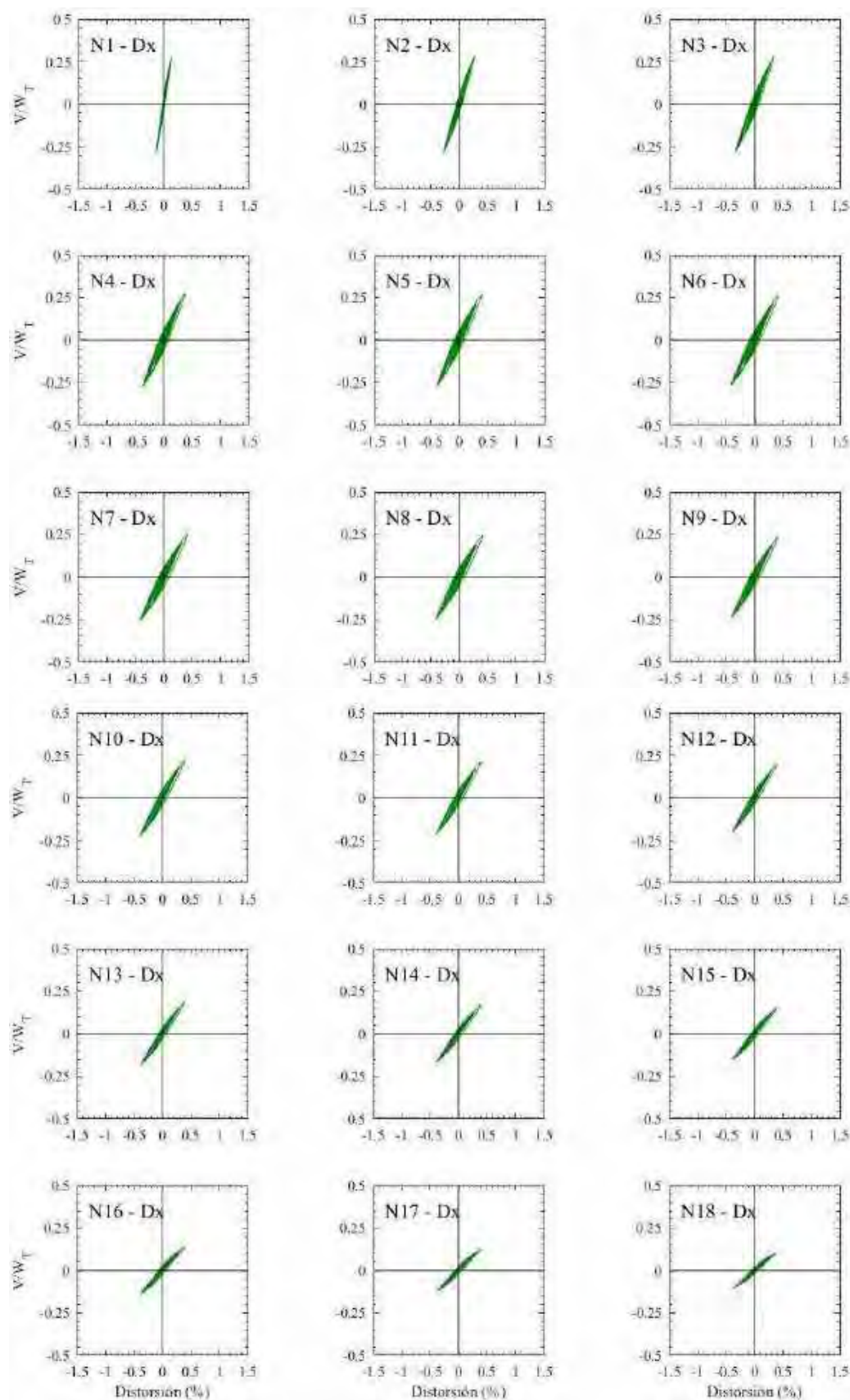


Figura H.37. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración ALAM85-A



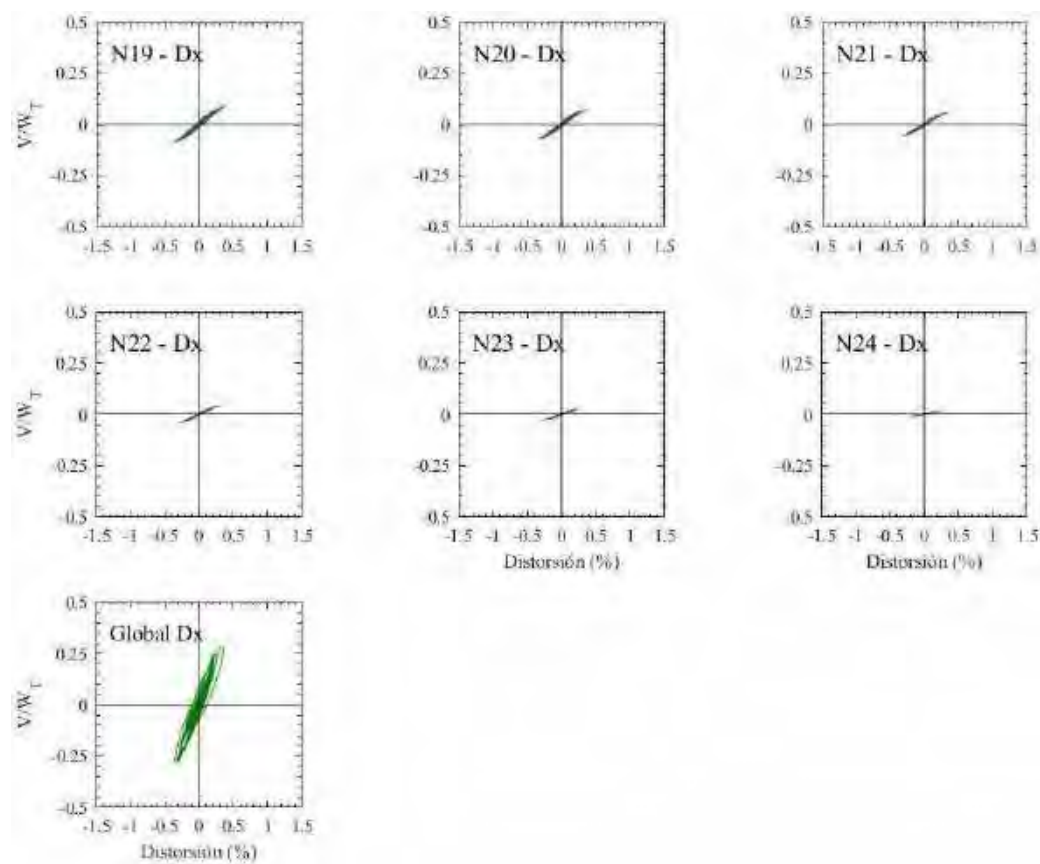
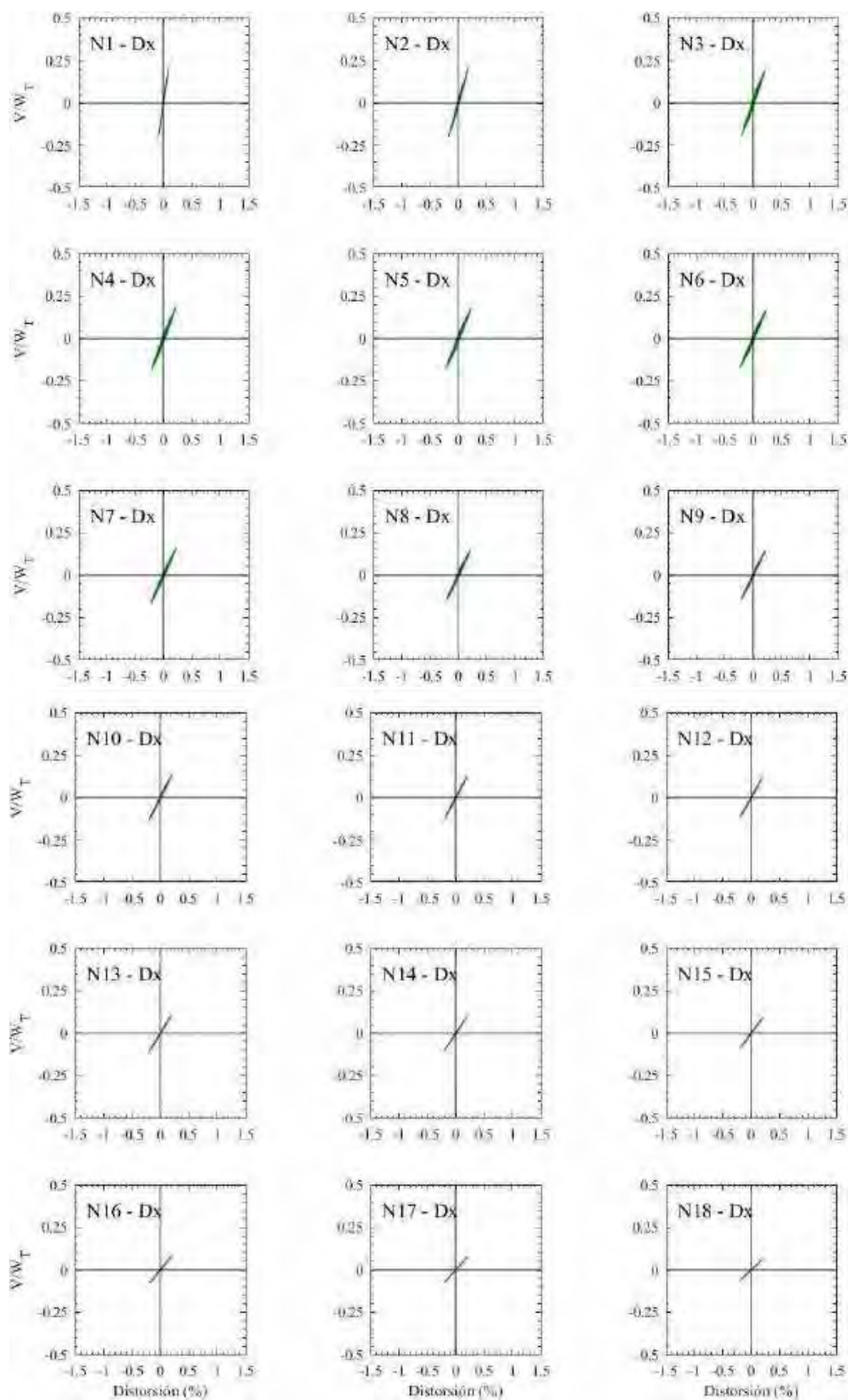


Figura H.38. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración ALAM85-B



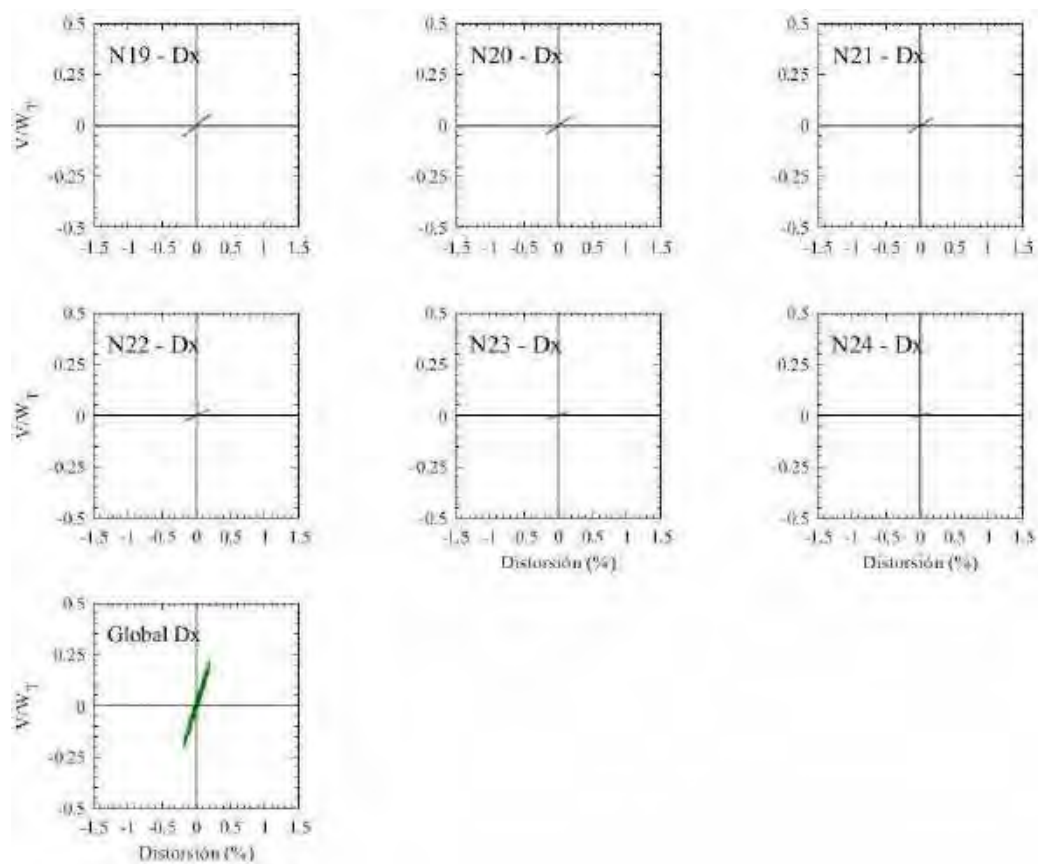
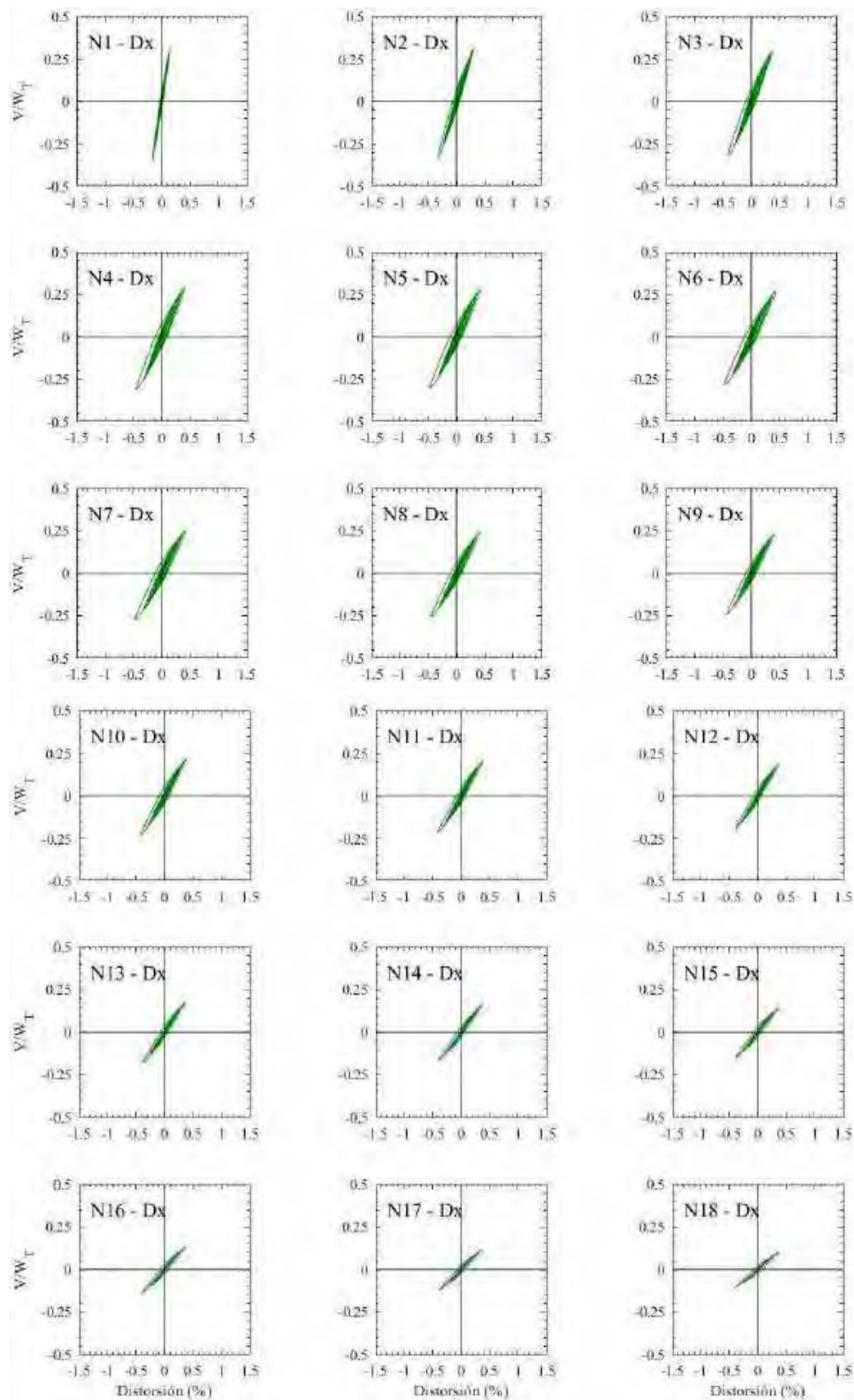


Figura H.39. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración TBOM-A (1985)



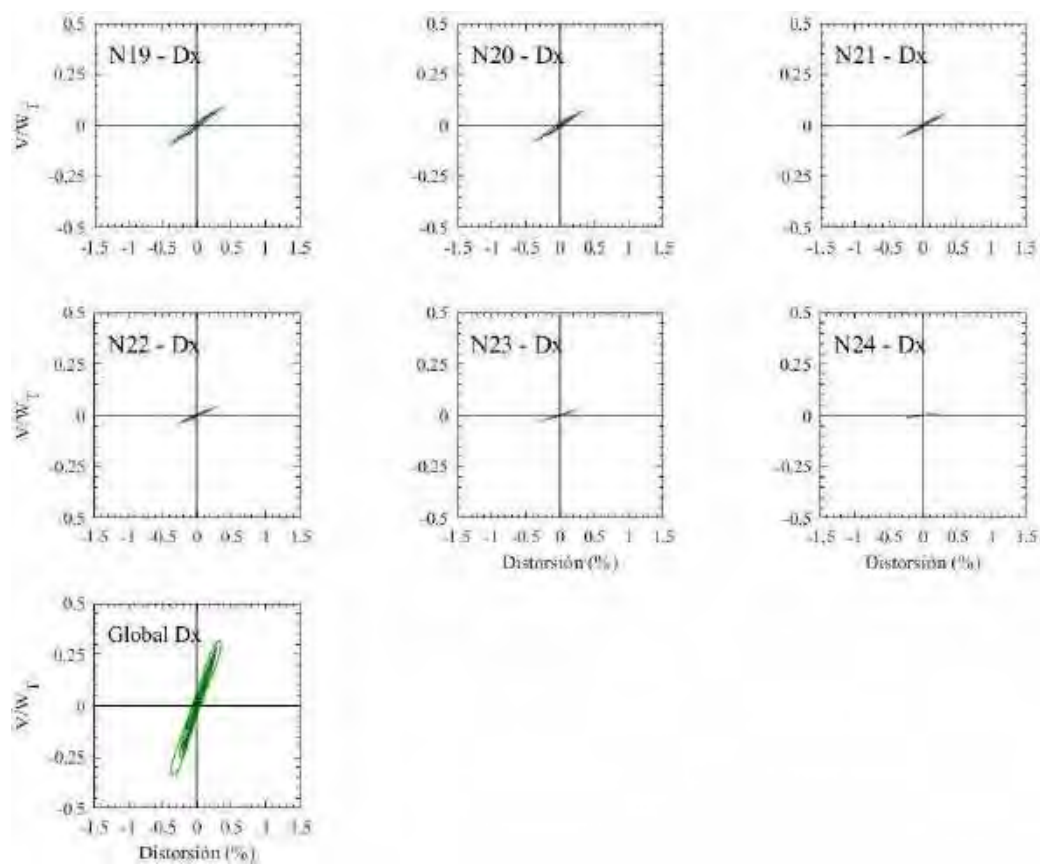
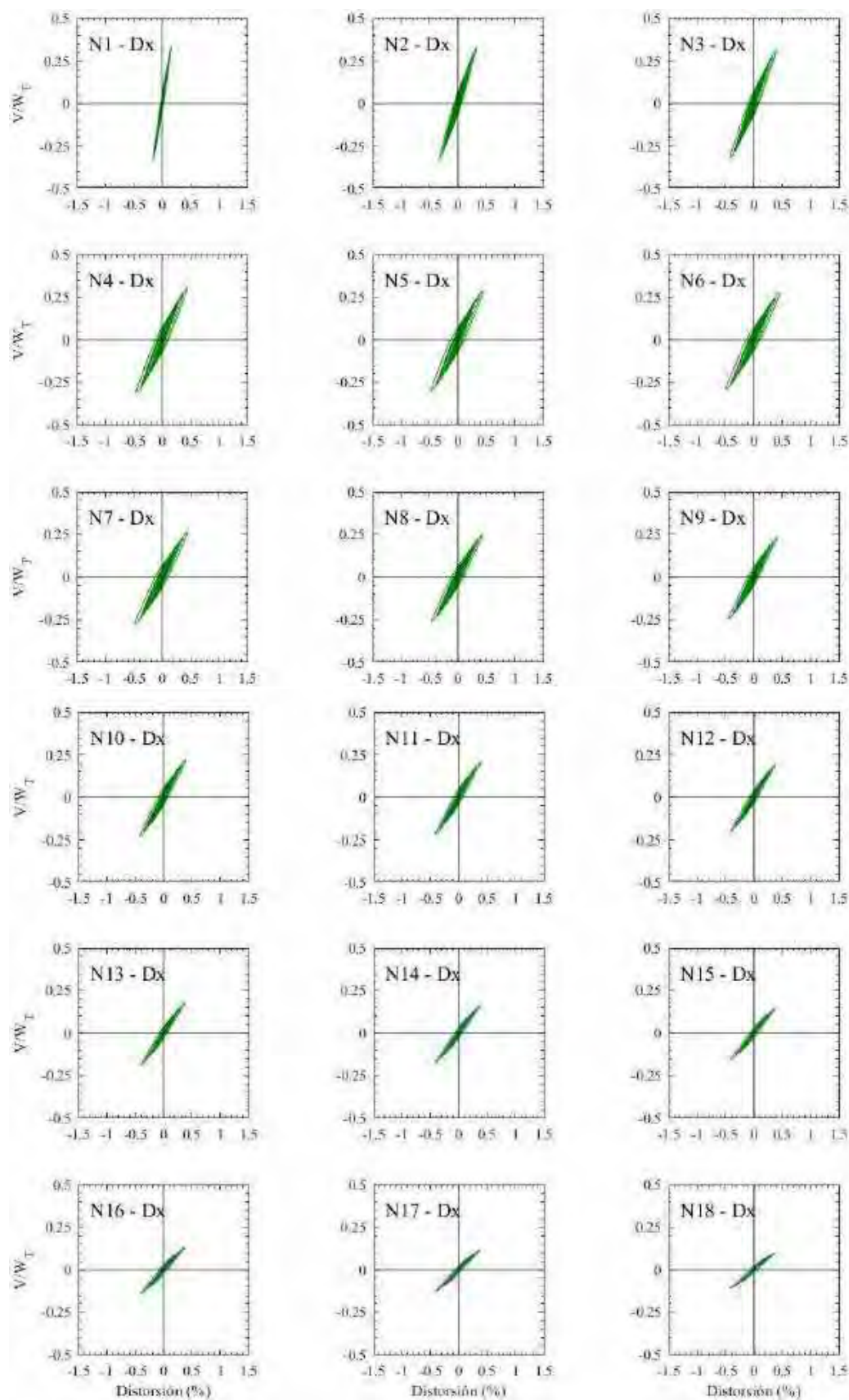


Figura H.40. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración TBOM –B (1985)



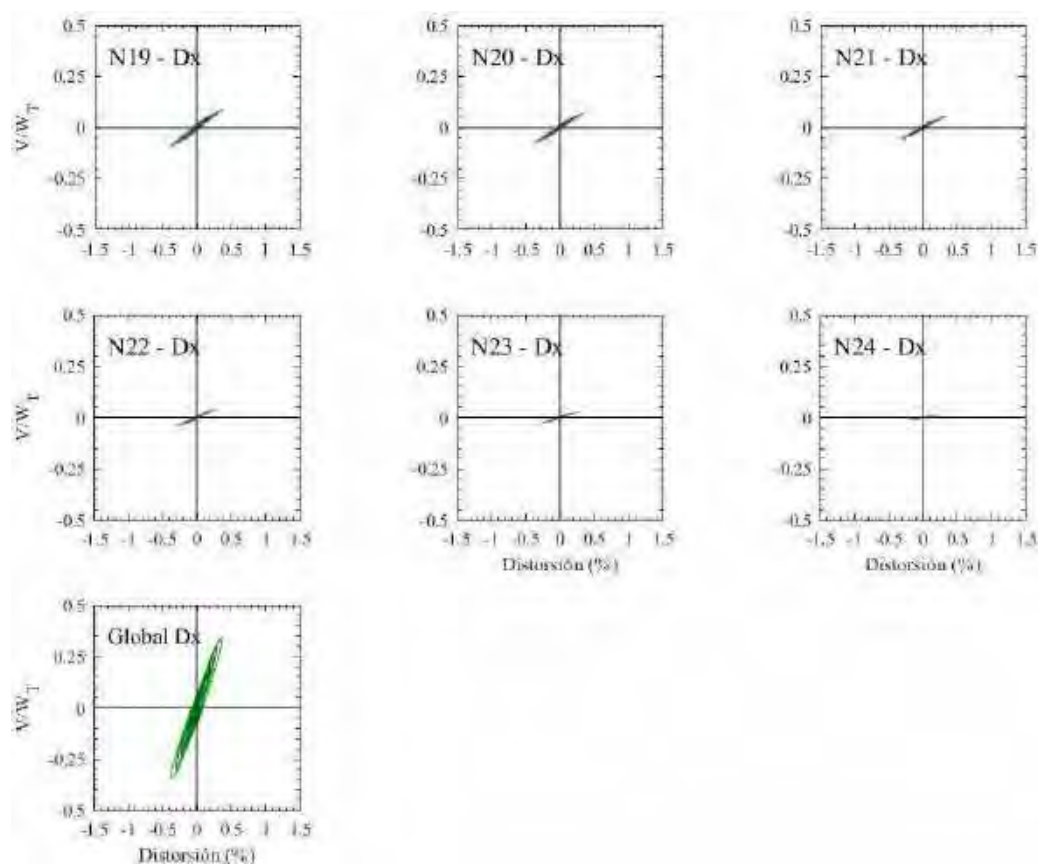
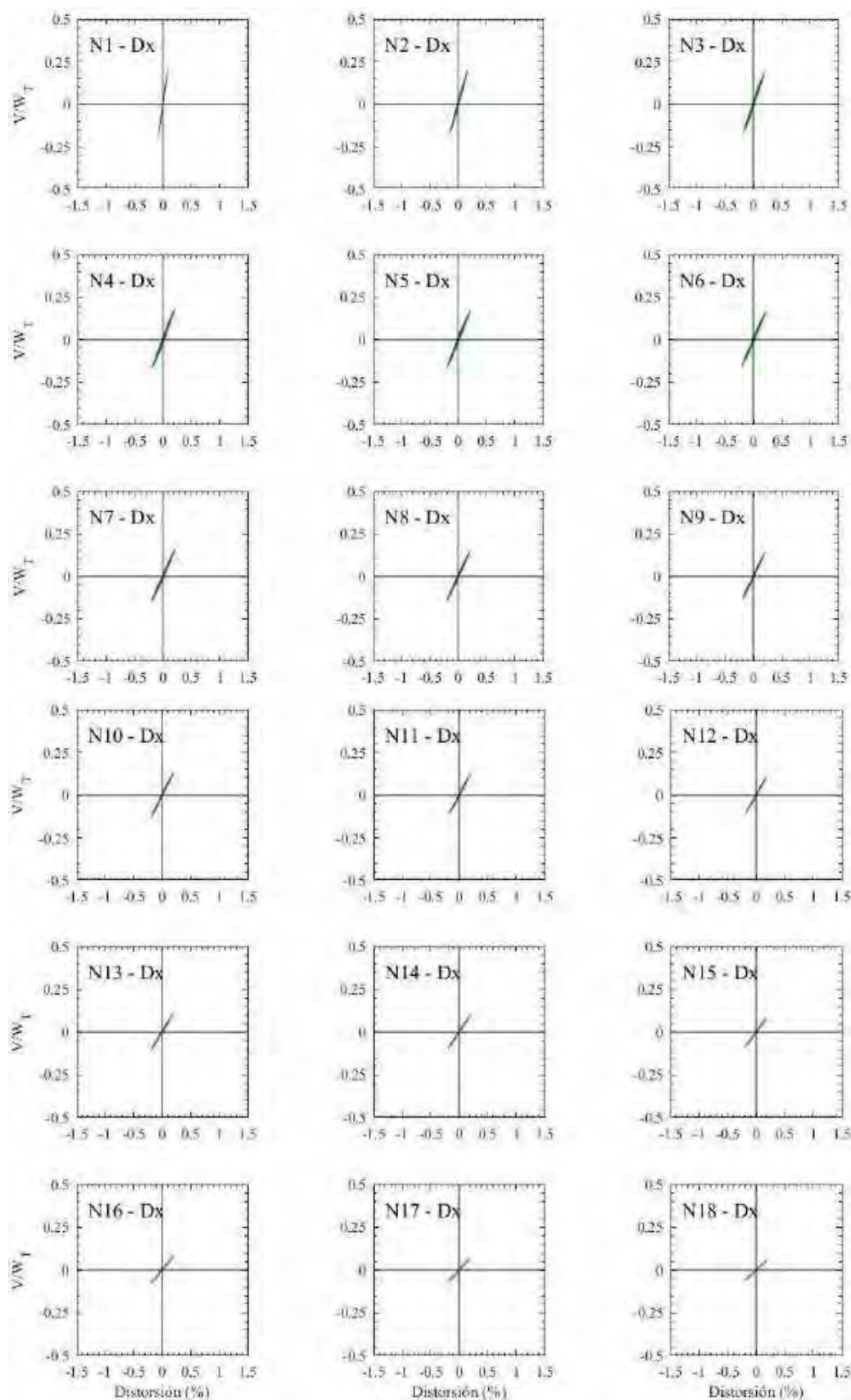


Figura H.41. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración SCT185-A (1985)



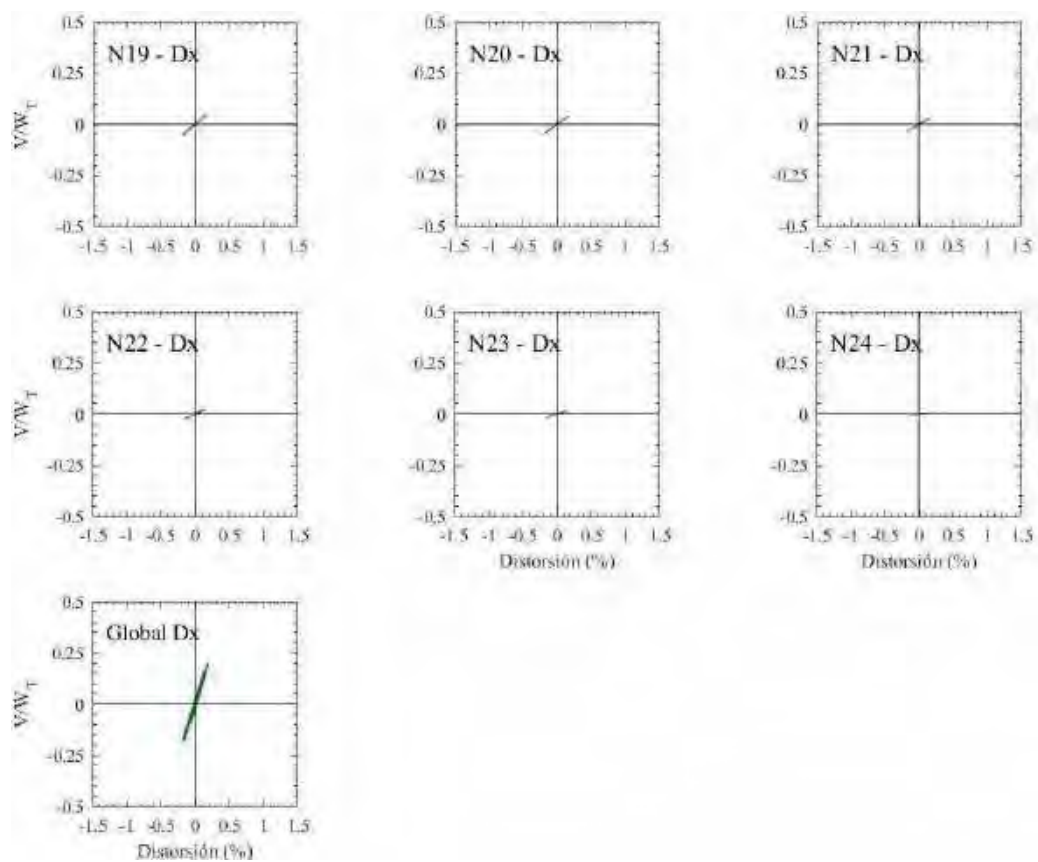
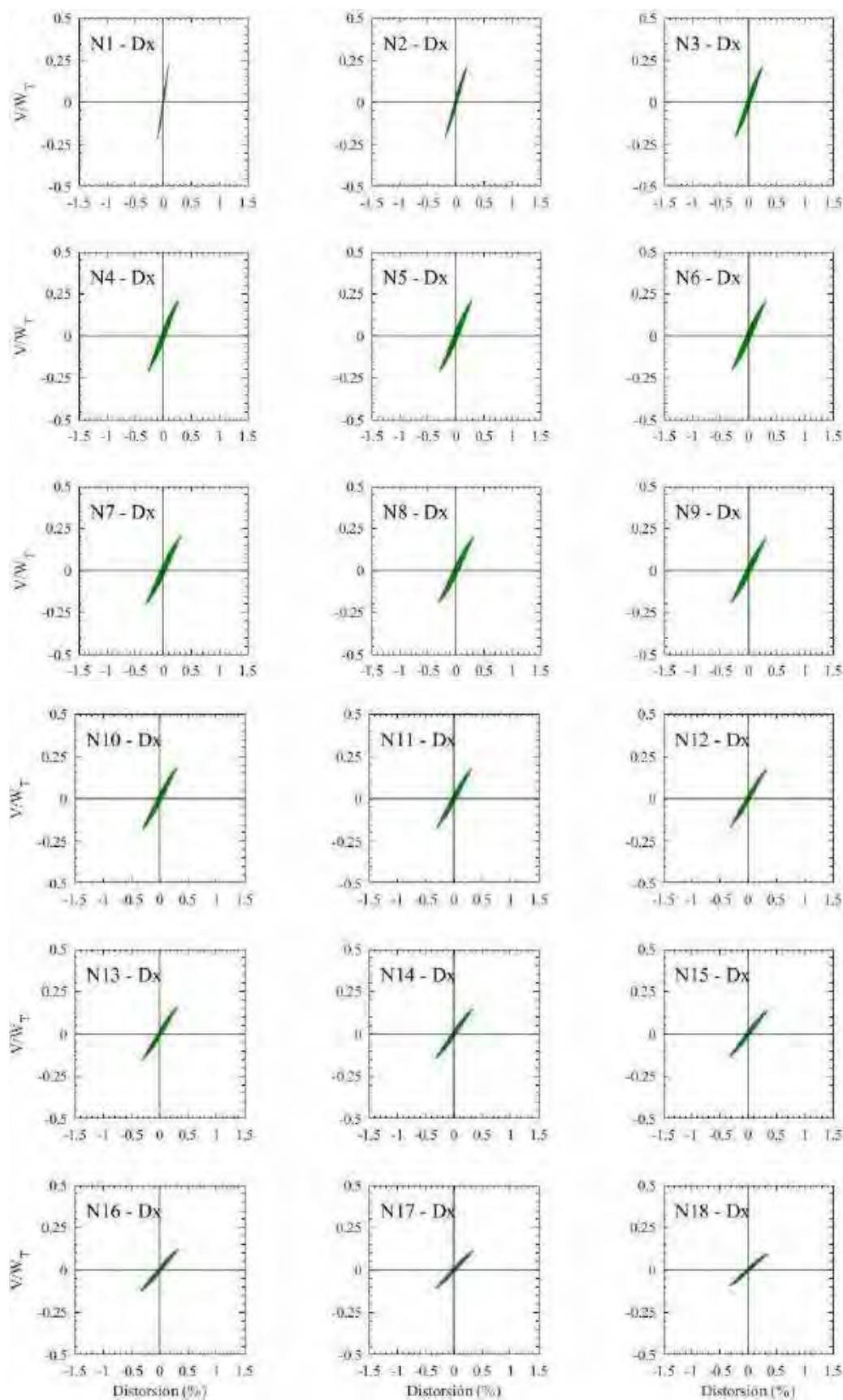


Figura H.42. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración SCT185-B (1985)



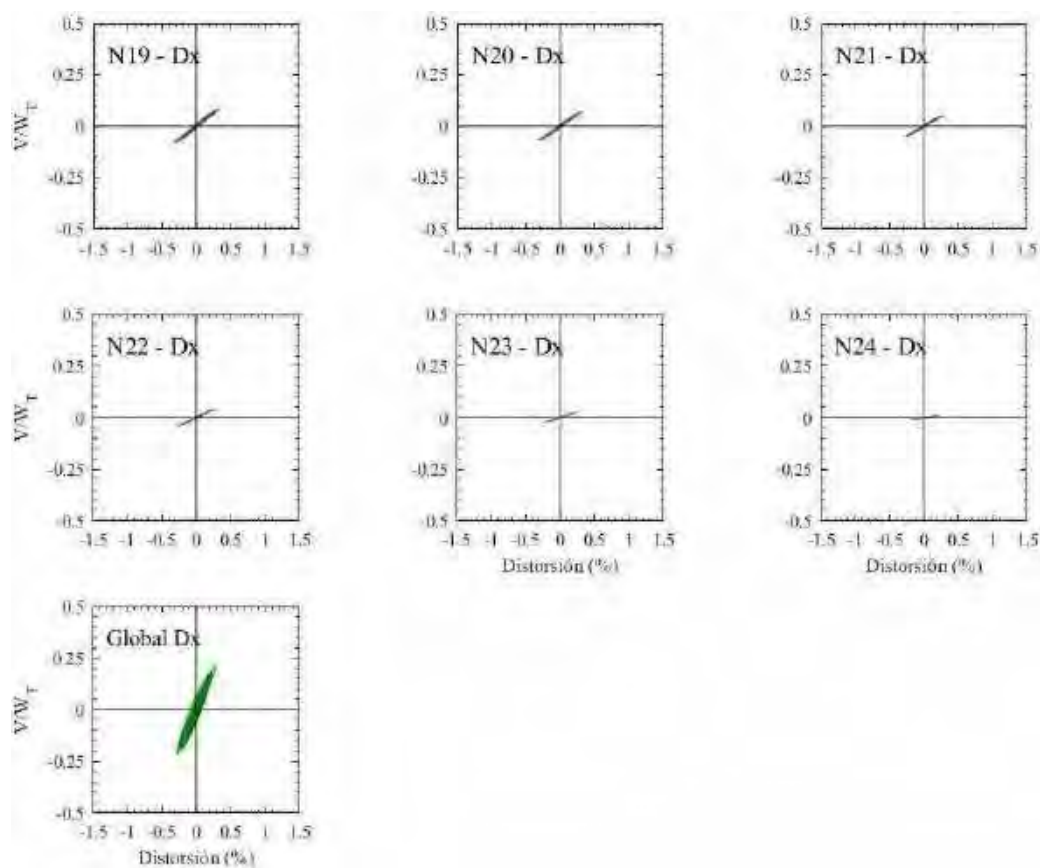
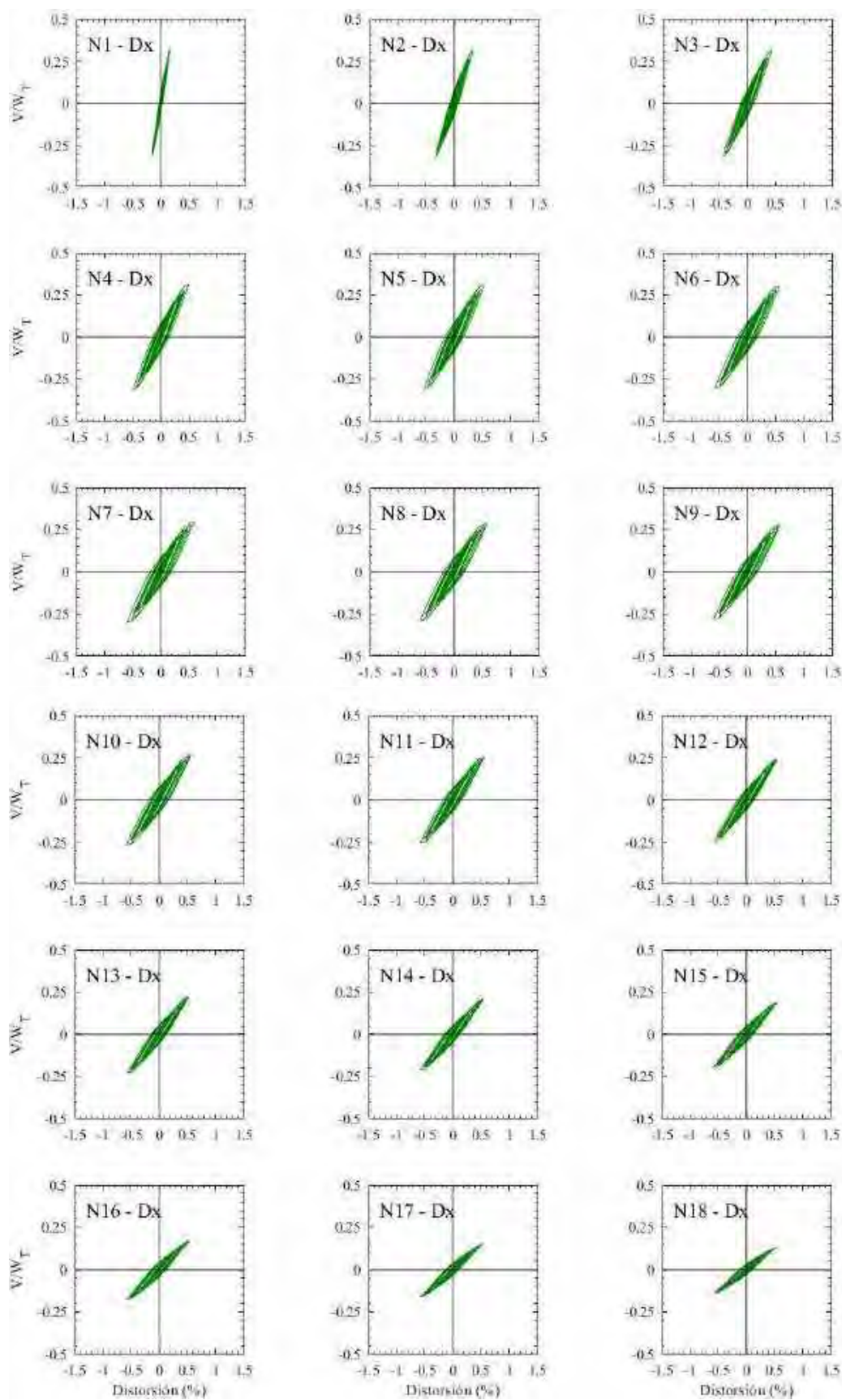


Figura H.43. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección x, registros de aceleración CH84-A (2017)



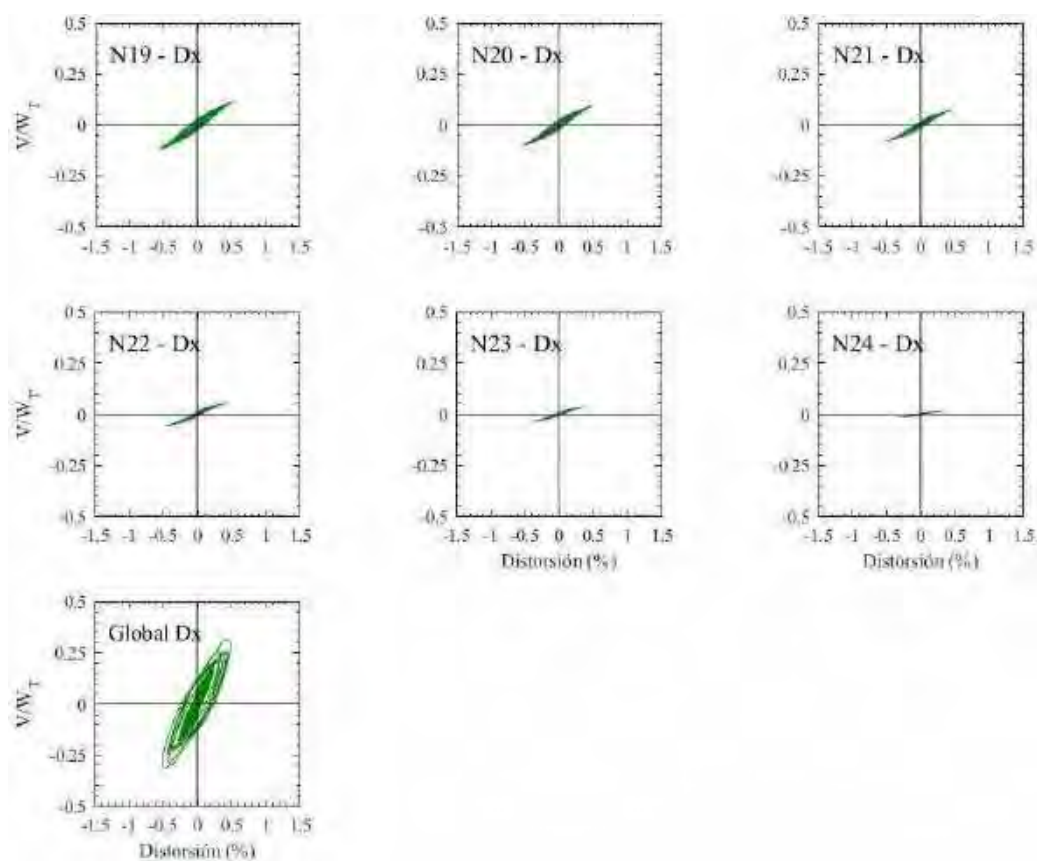
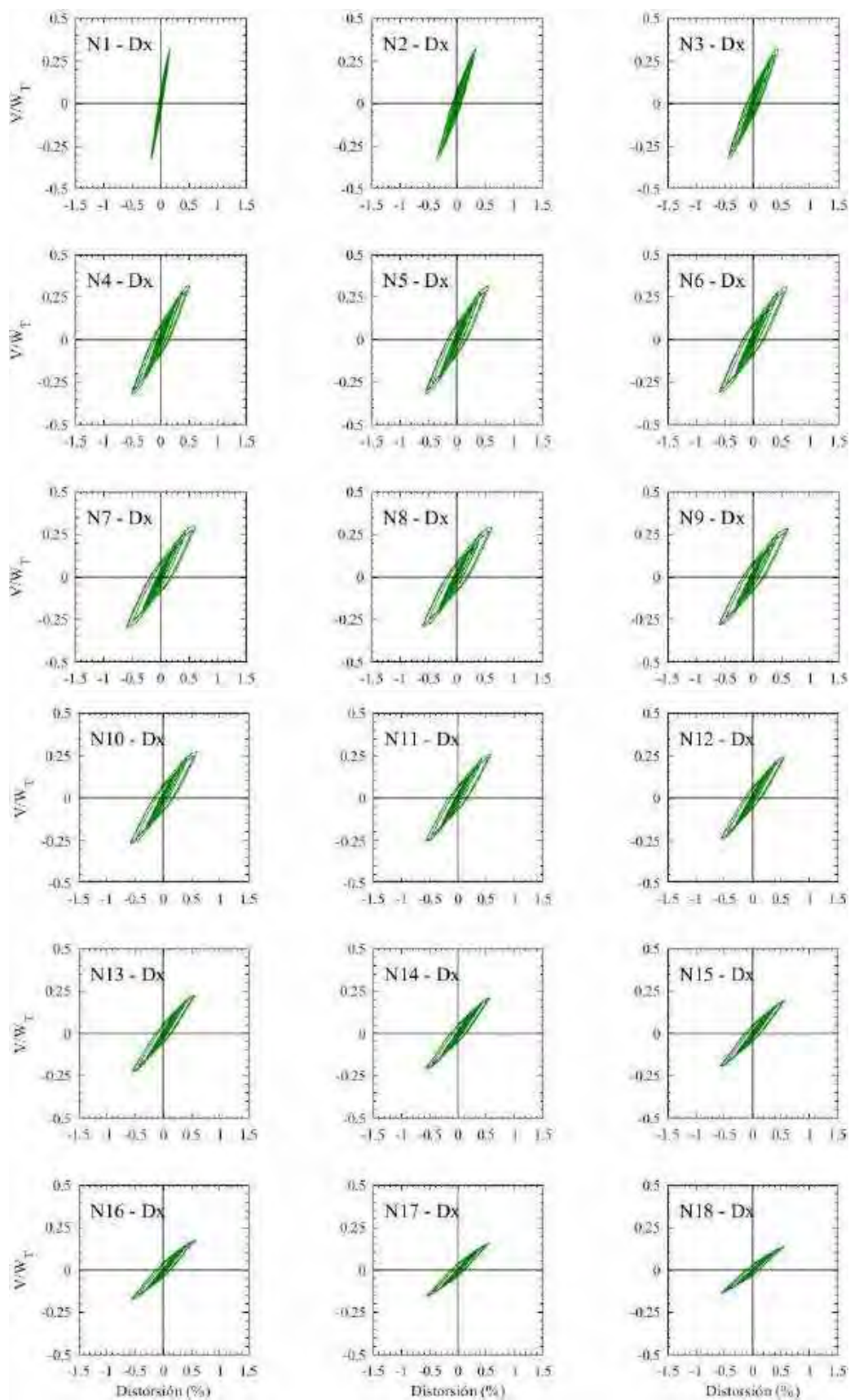


Figura H.44. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección x, registros de aceleración CH84-B (2017)



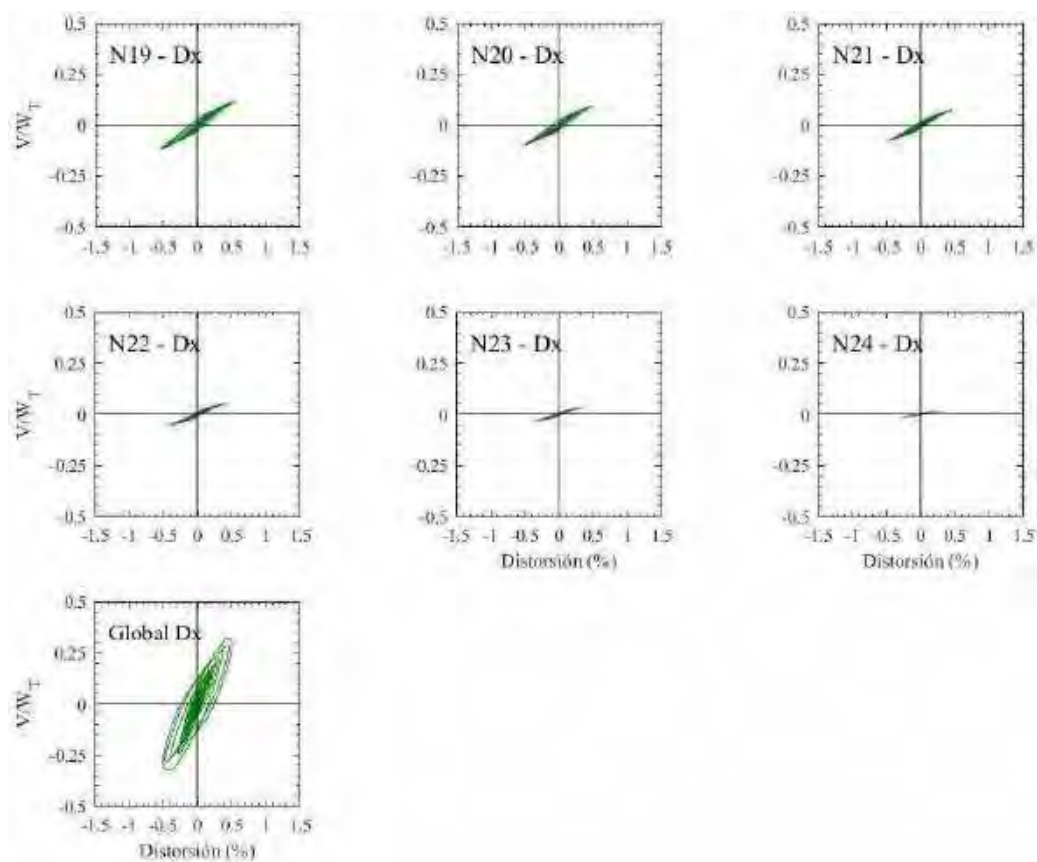
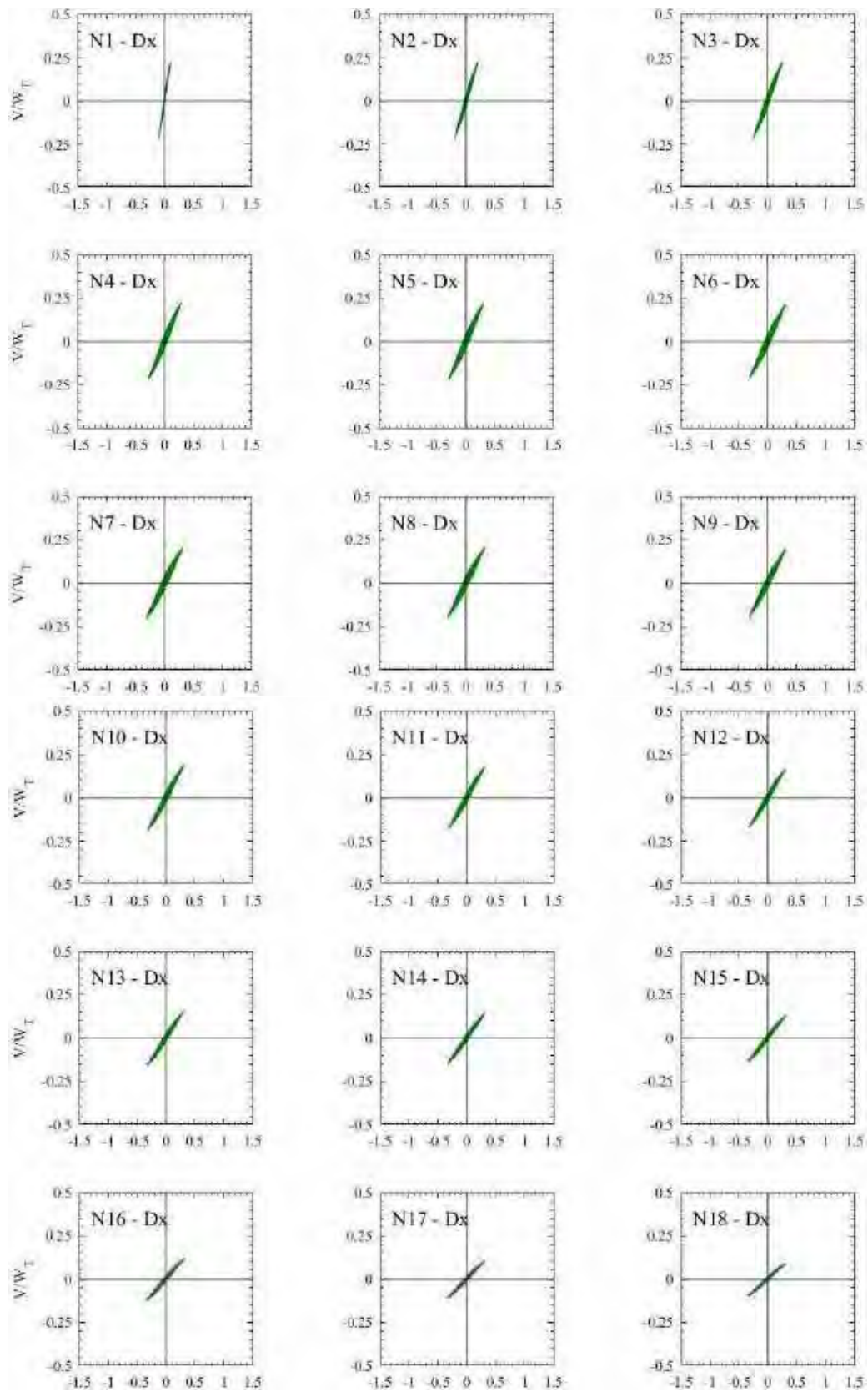


Figura H.45. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración MI15-A (2017)



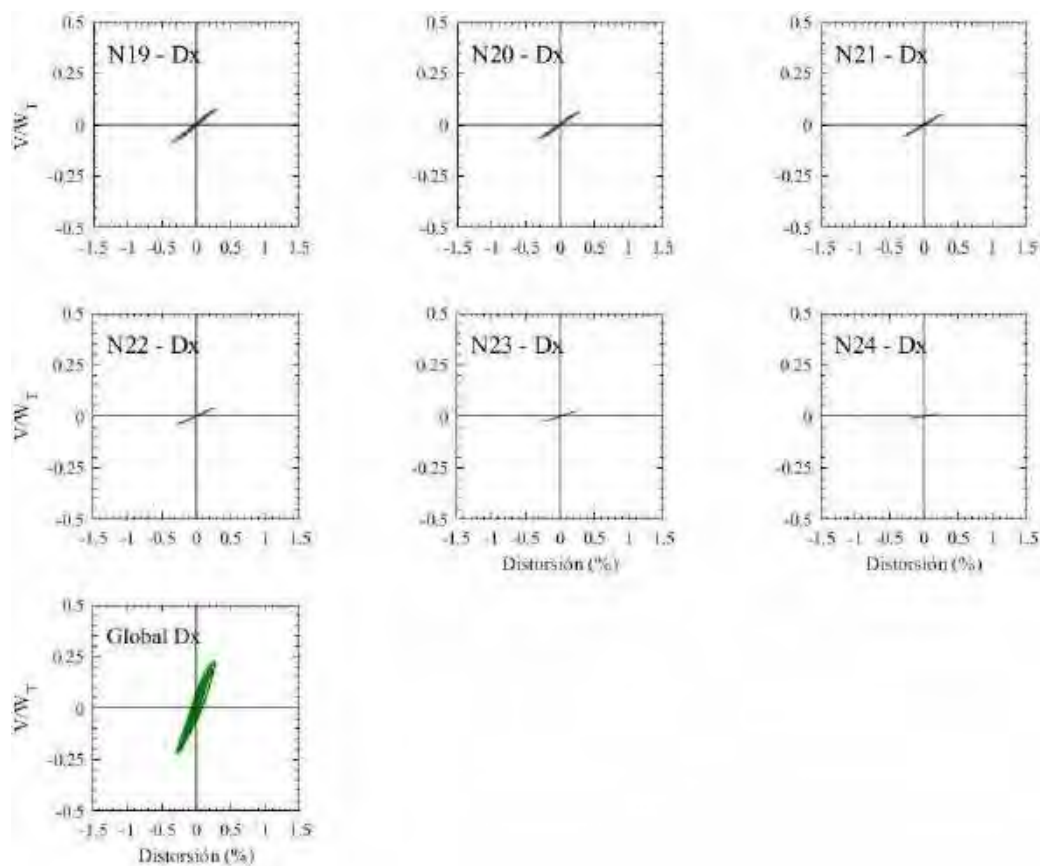
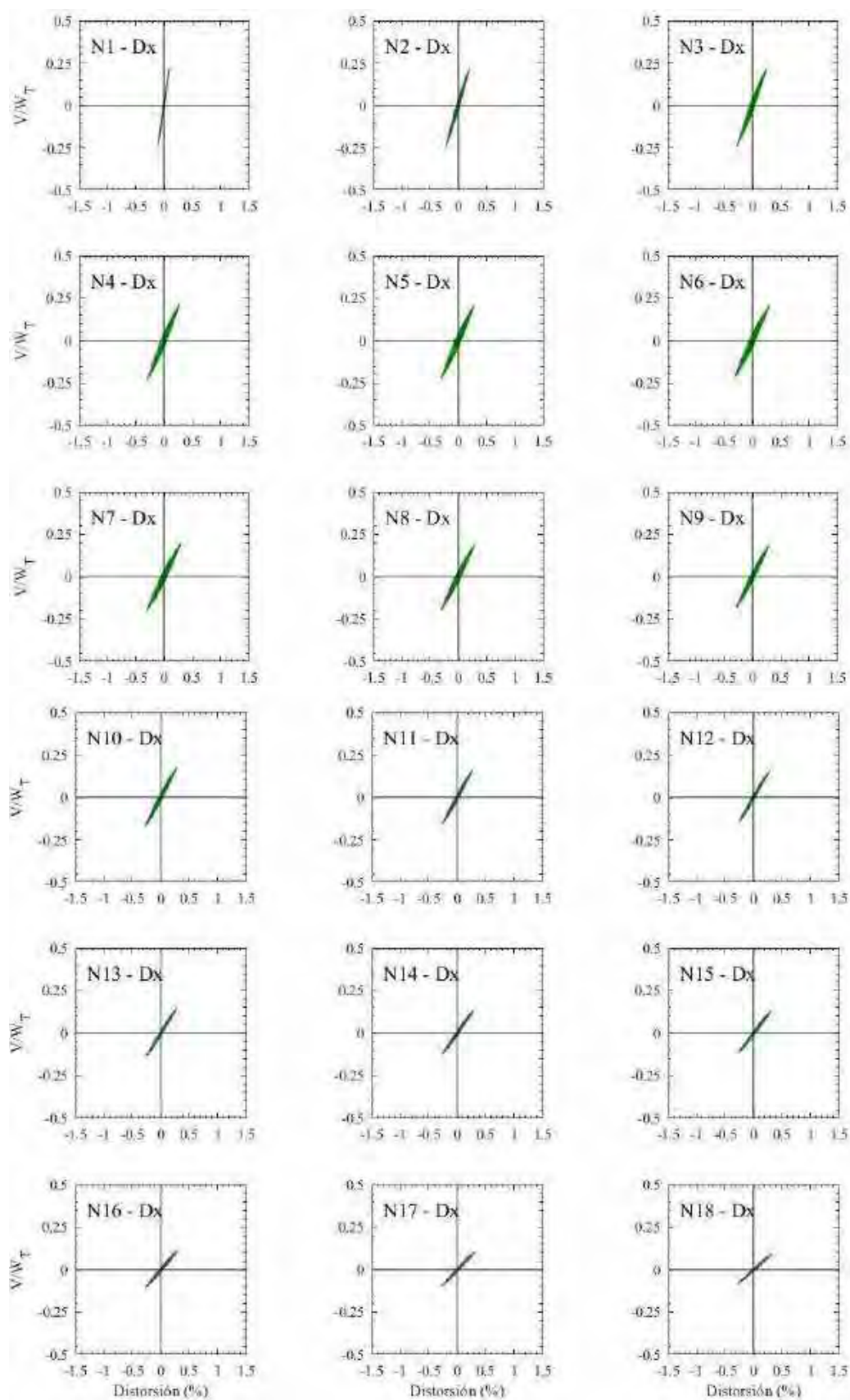


Figura H.46. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración MI15-B (2017)



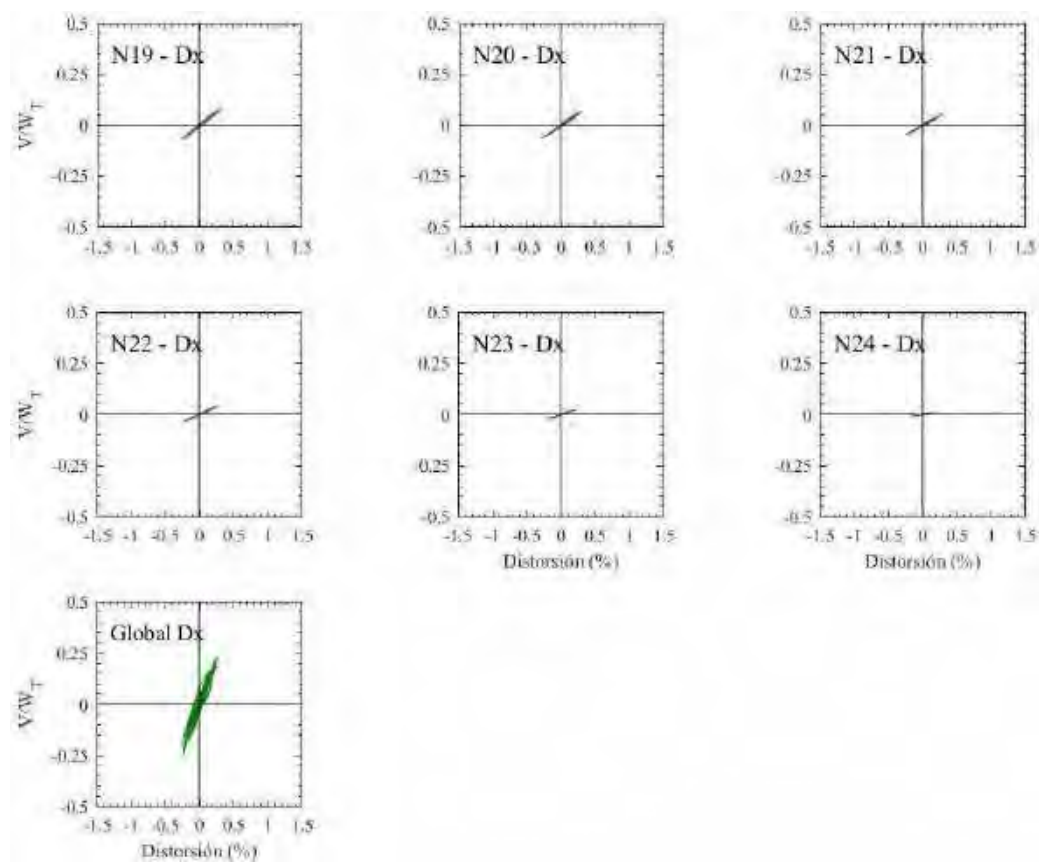
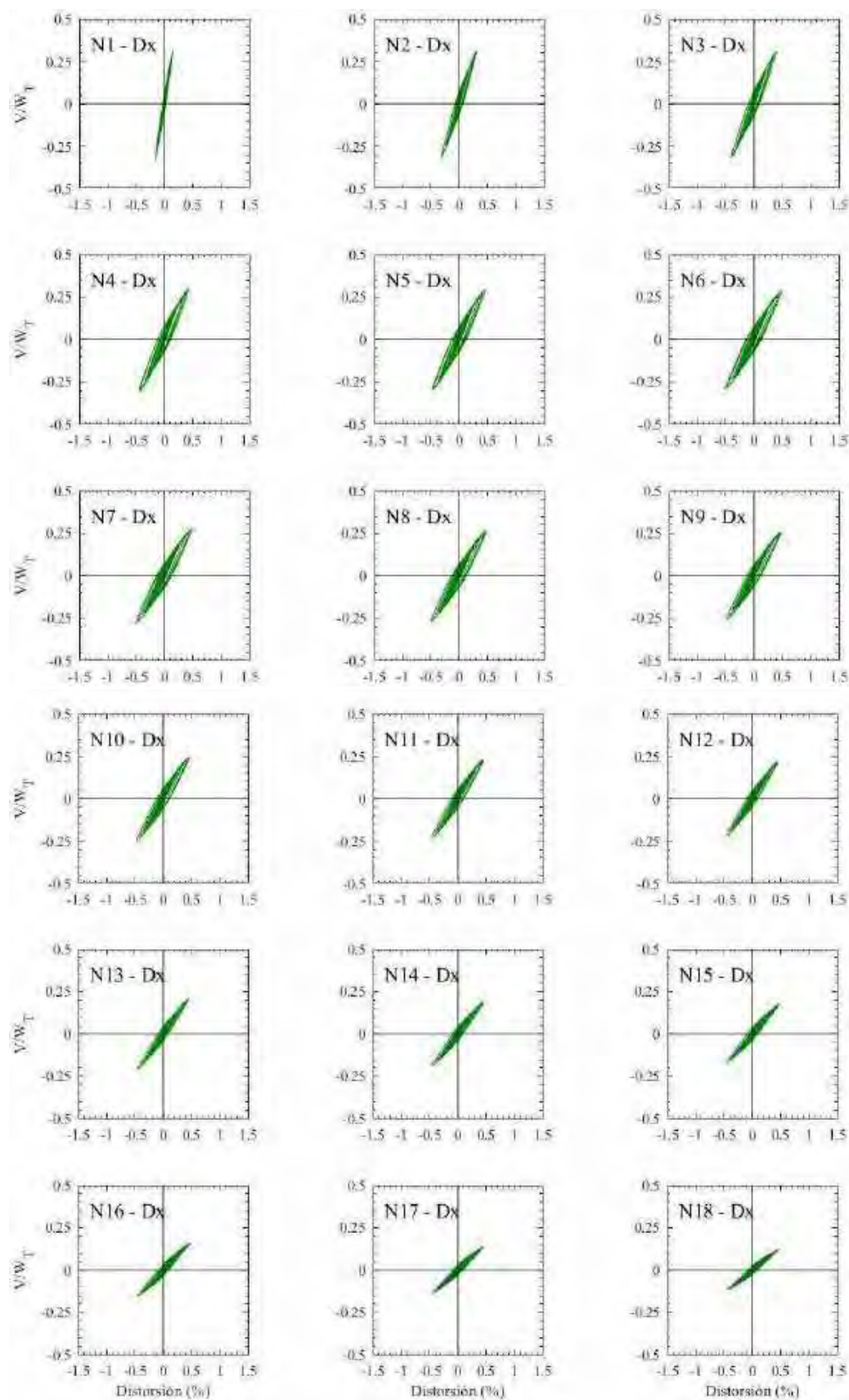


Figura H.47. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración XO36-A (2017)



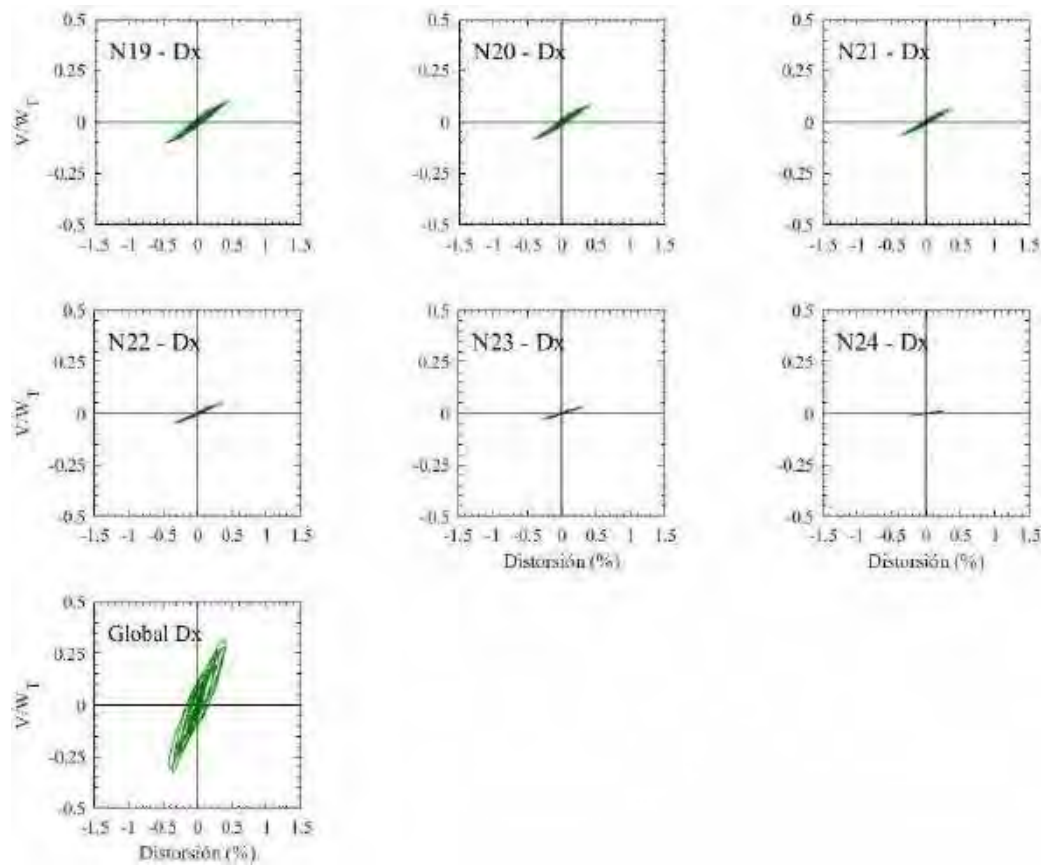
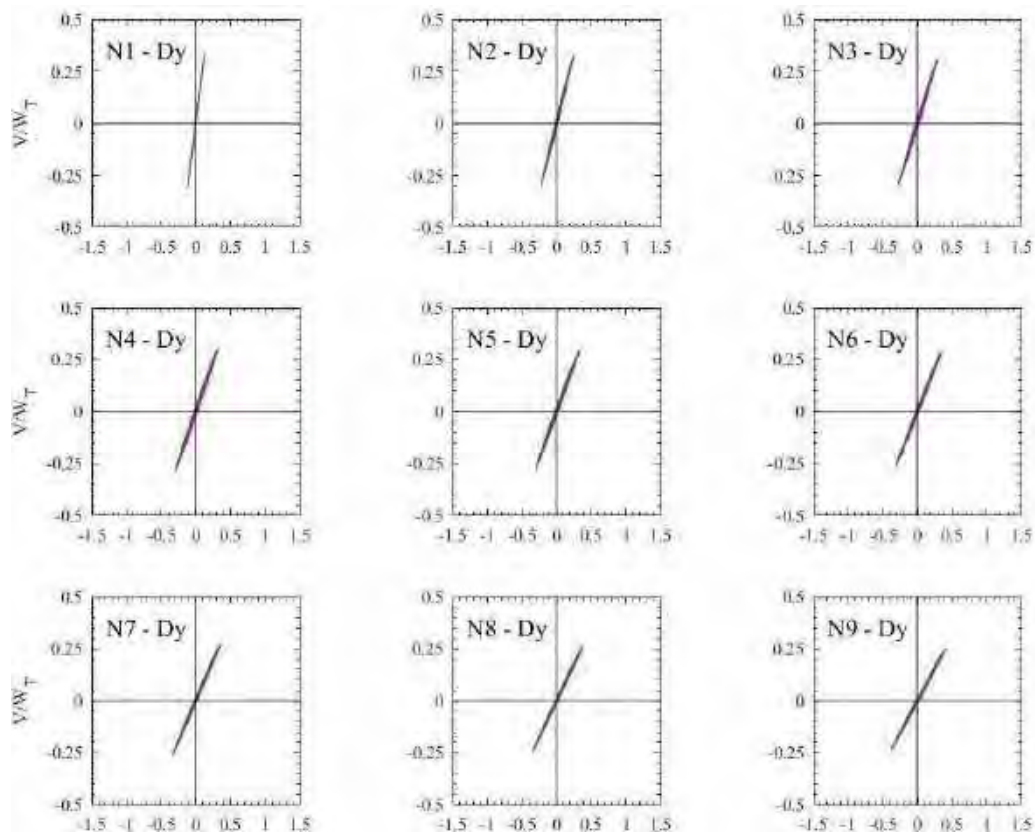


Figura H.48. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.1.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y



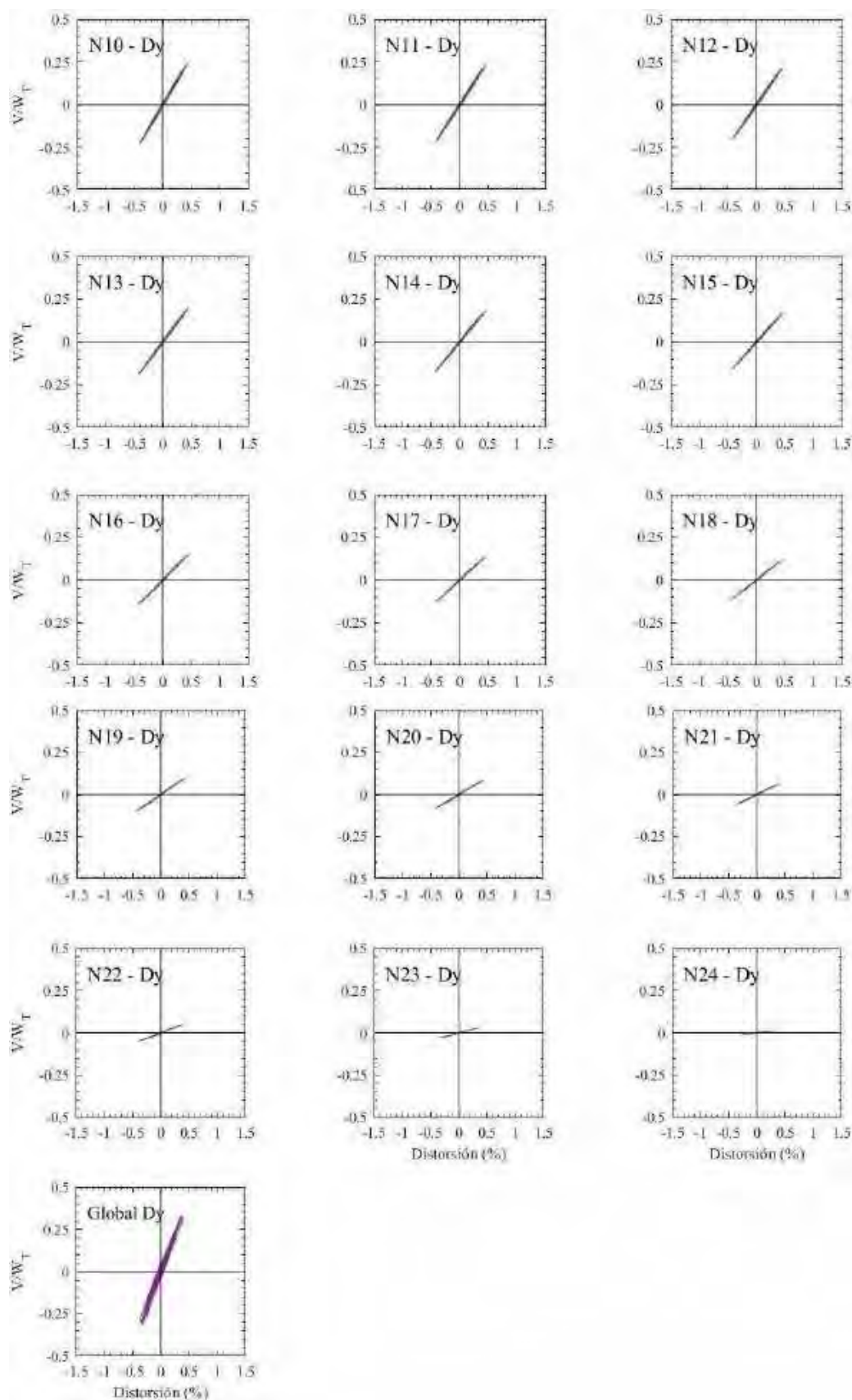
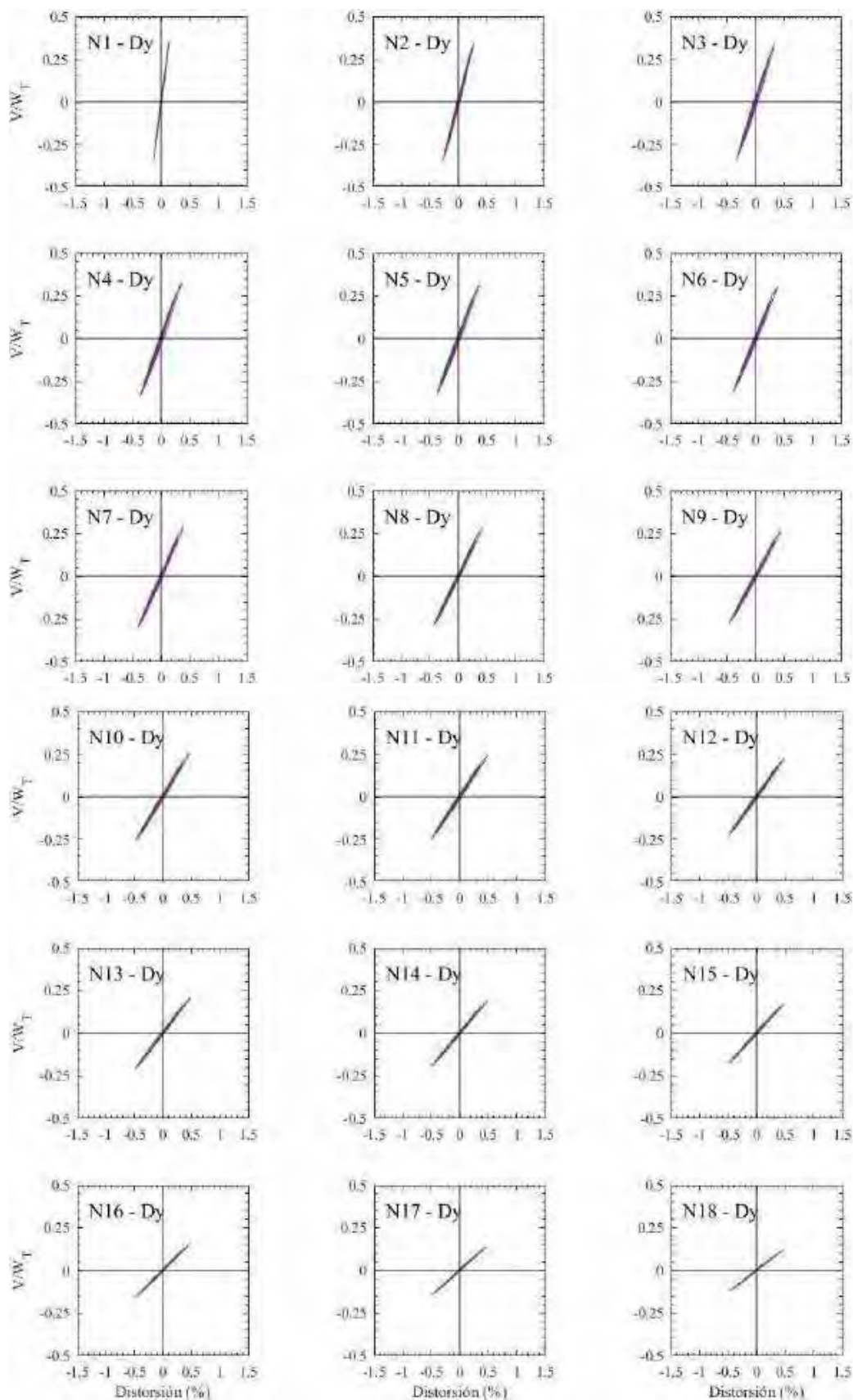


Figura H.49. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración TL08-A



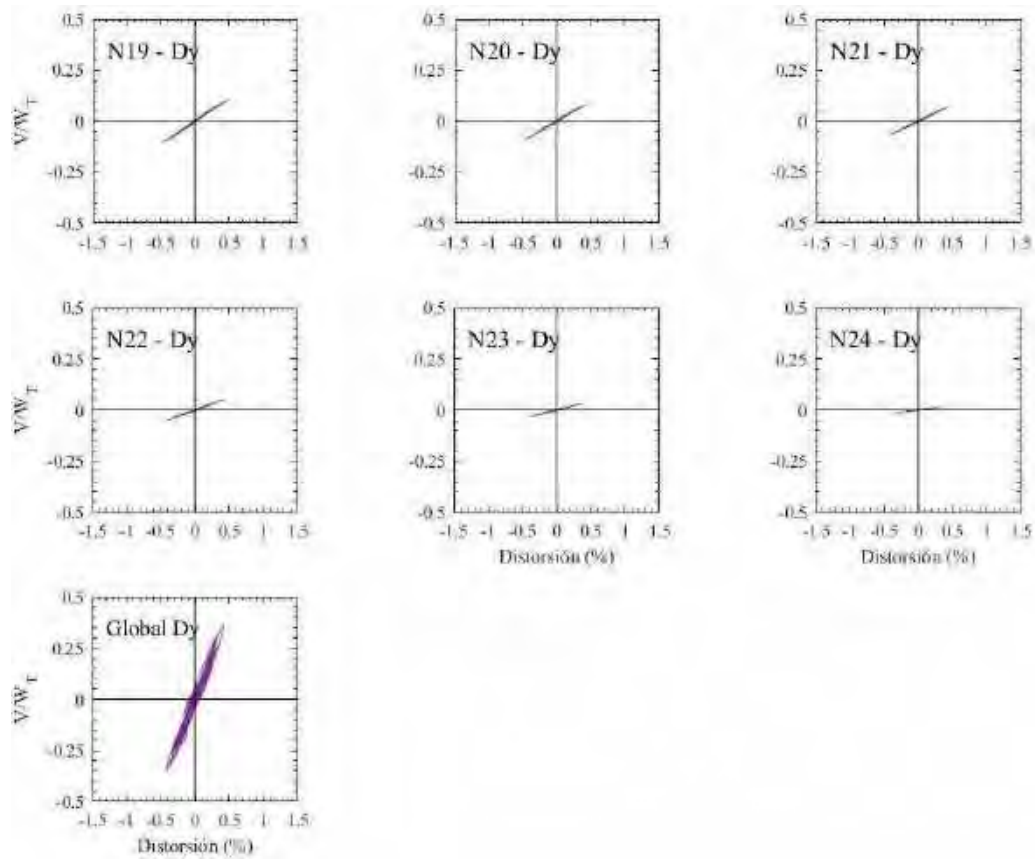
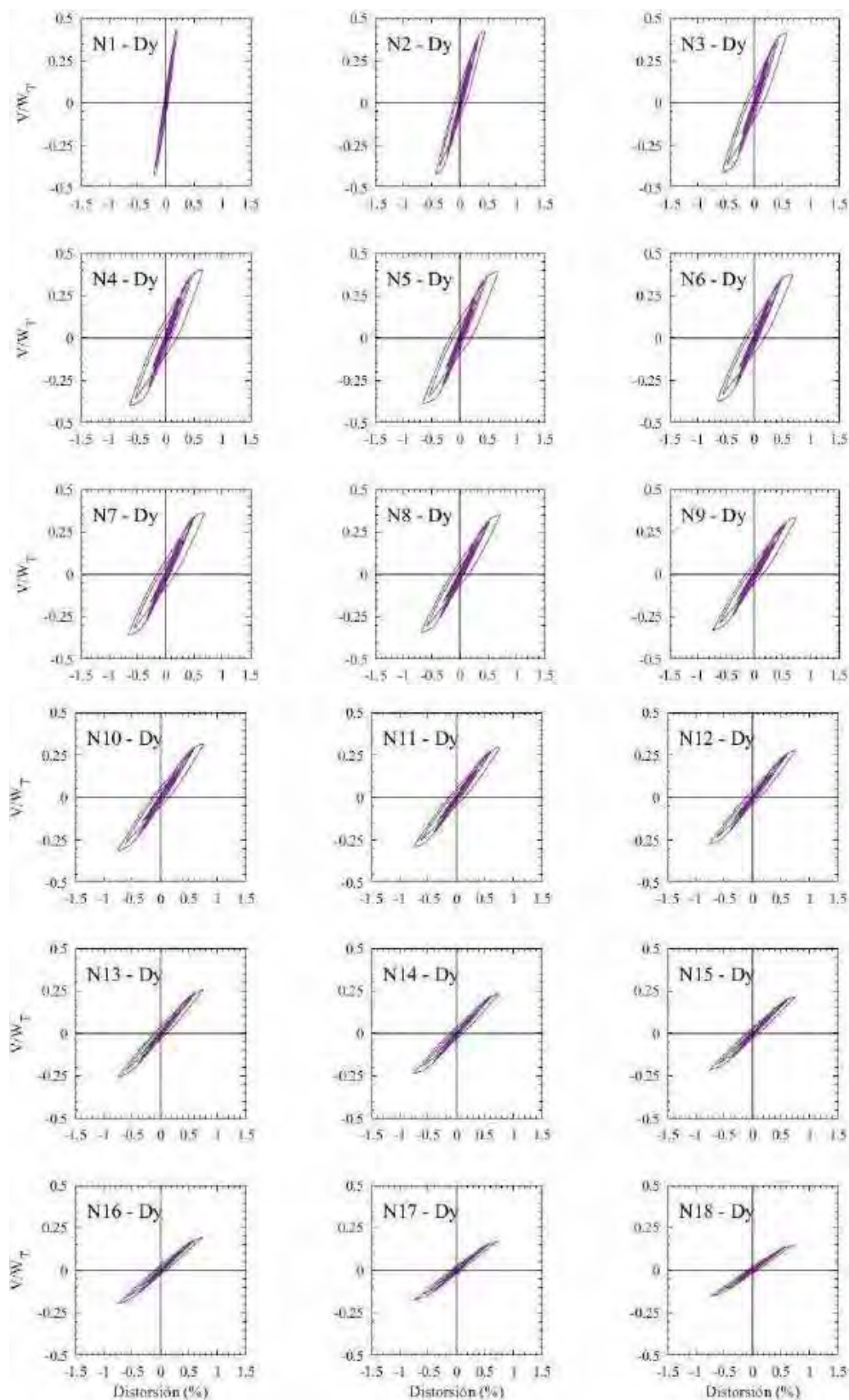


Figura H.50. Ciclos de histéresis de los entropisos en dirección y, registros de aceleración TL08-B



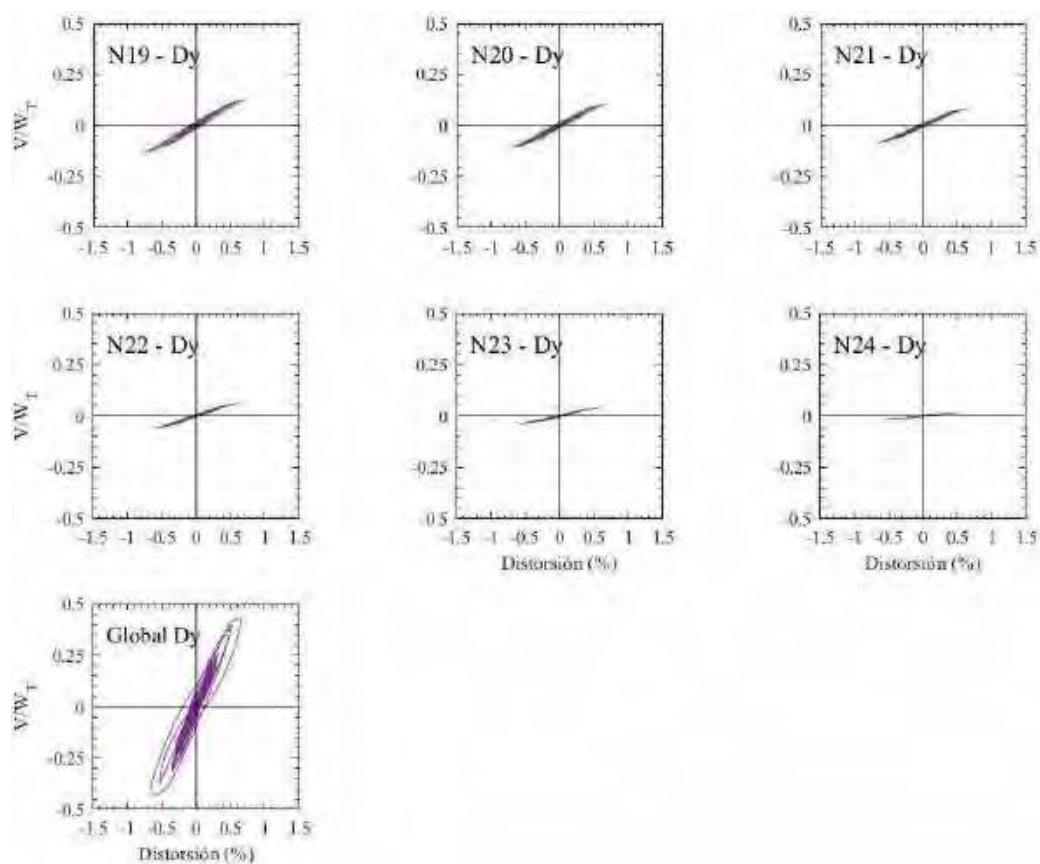
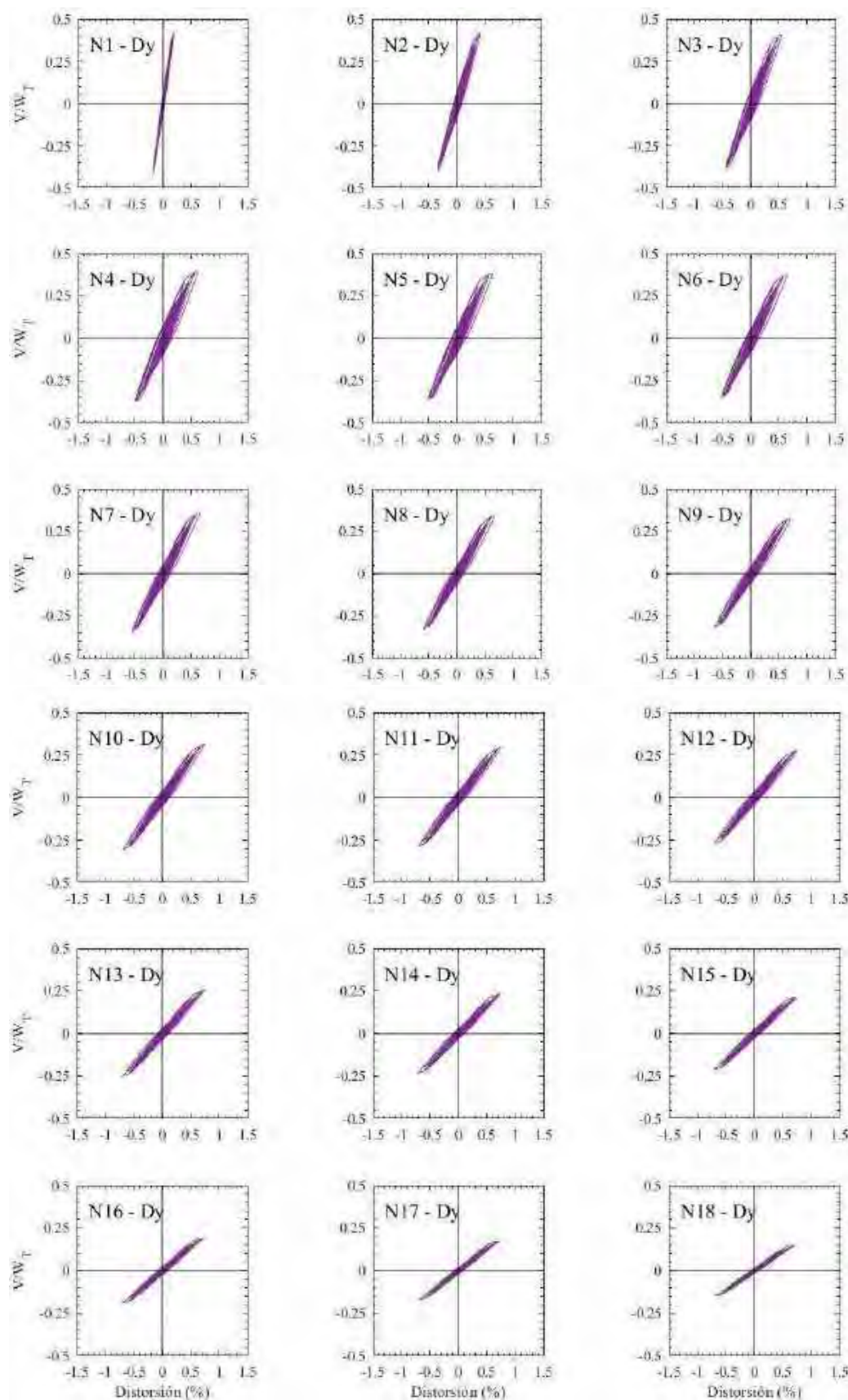


Figura H.51. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CJ03-A



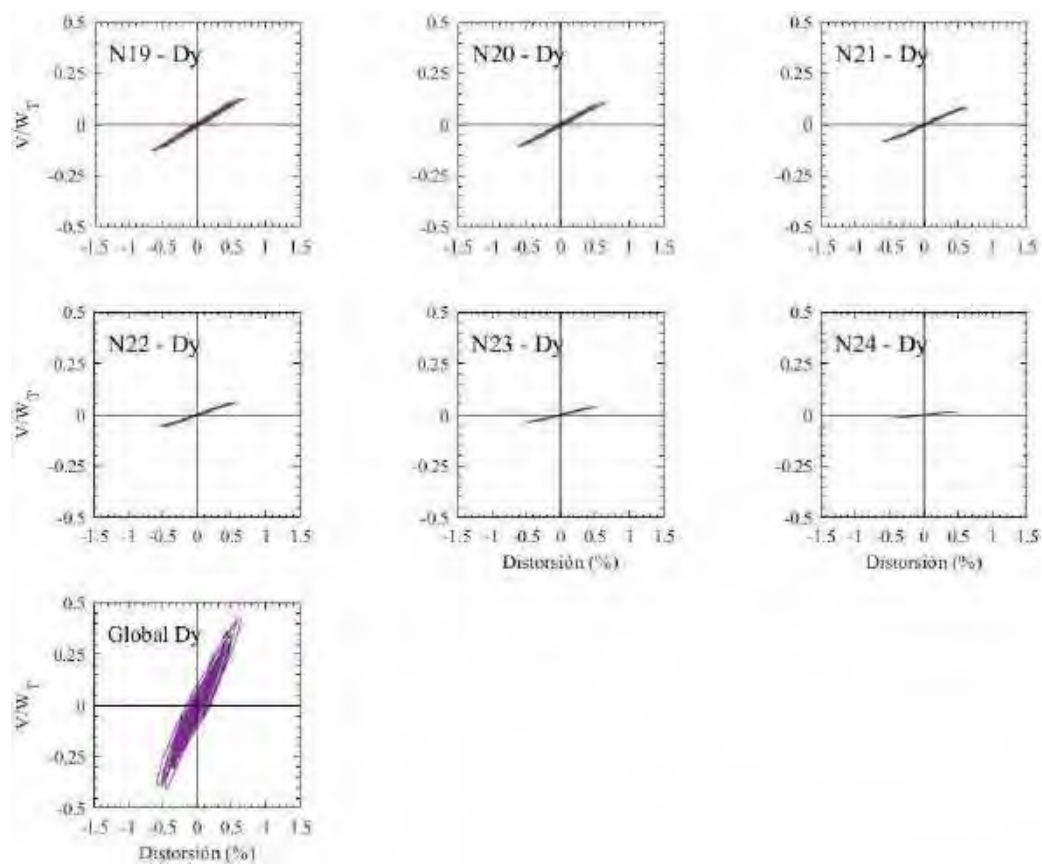
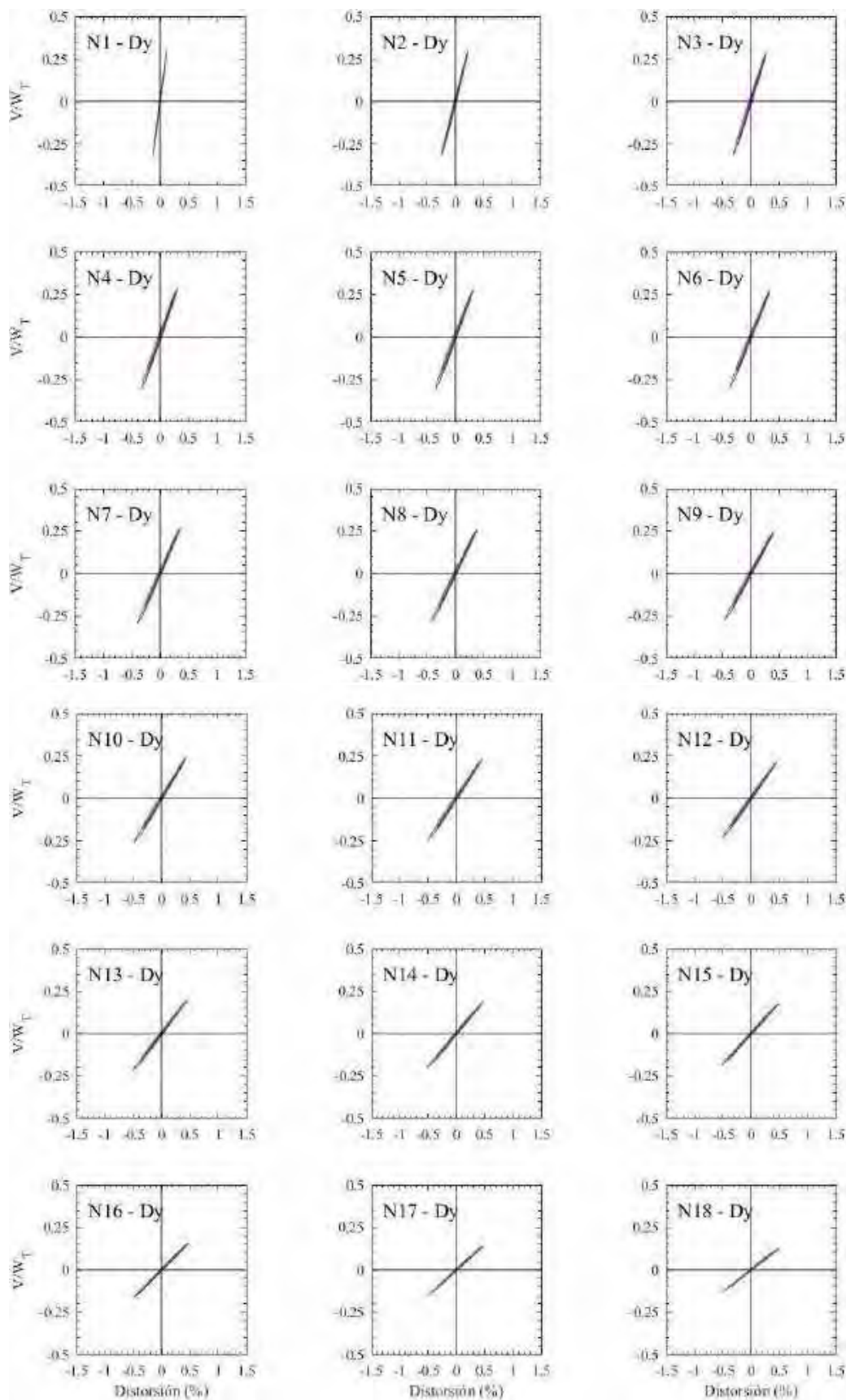


Figura H.52. Ciclos de histéresis de los entropisos en dirección y, registros de aceleración CJ03-B



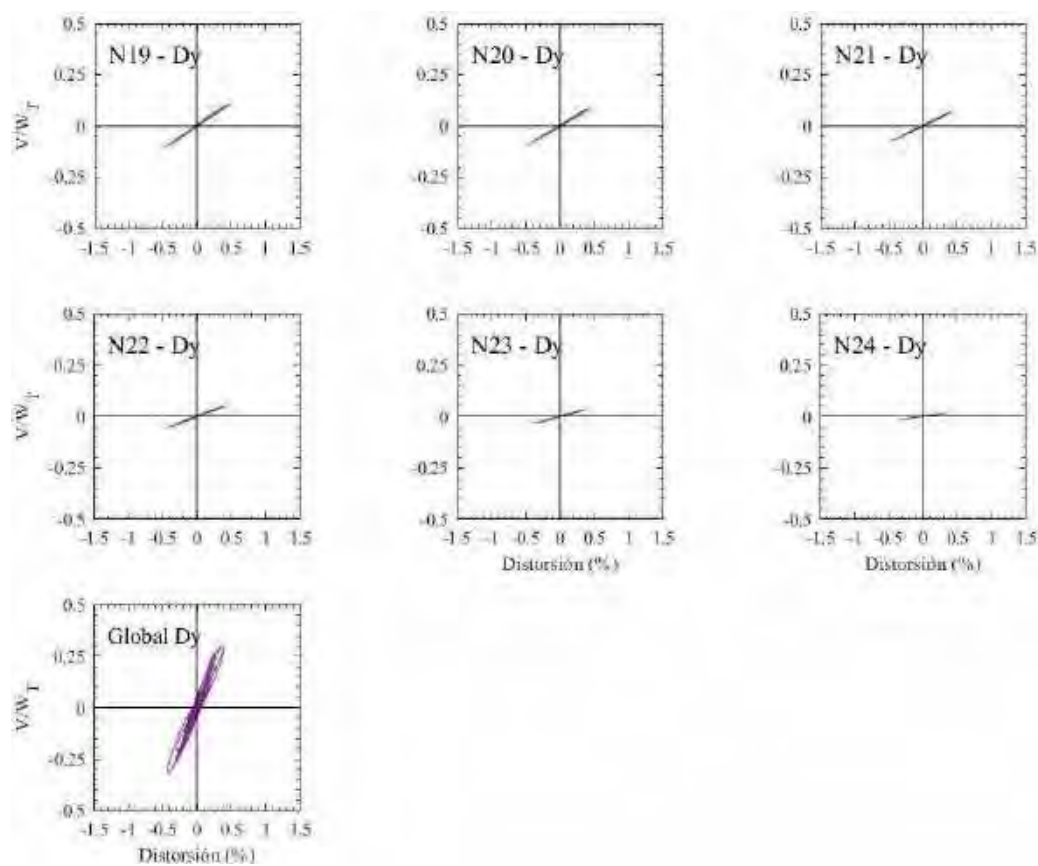
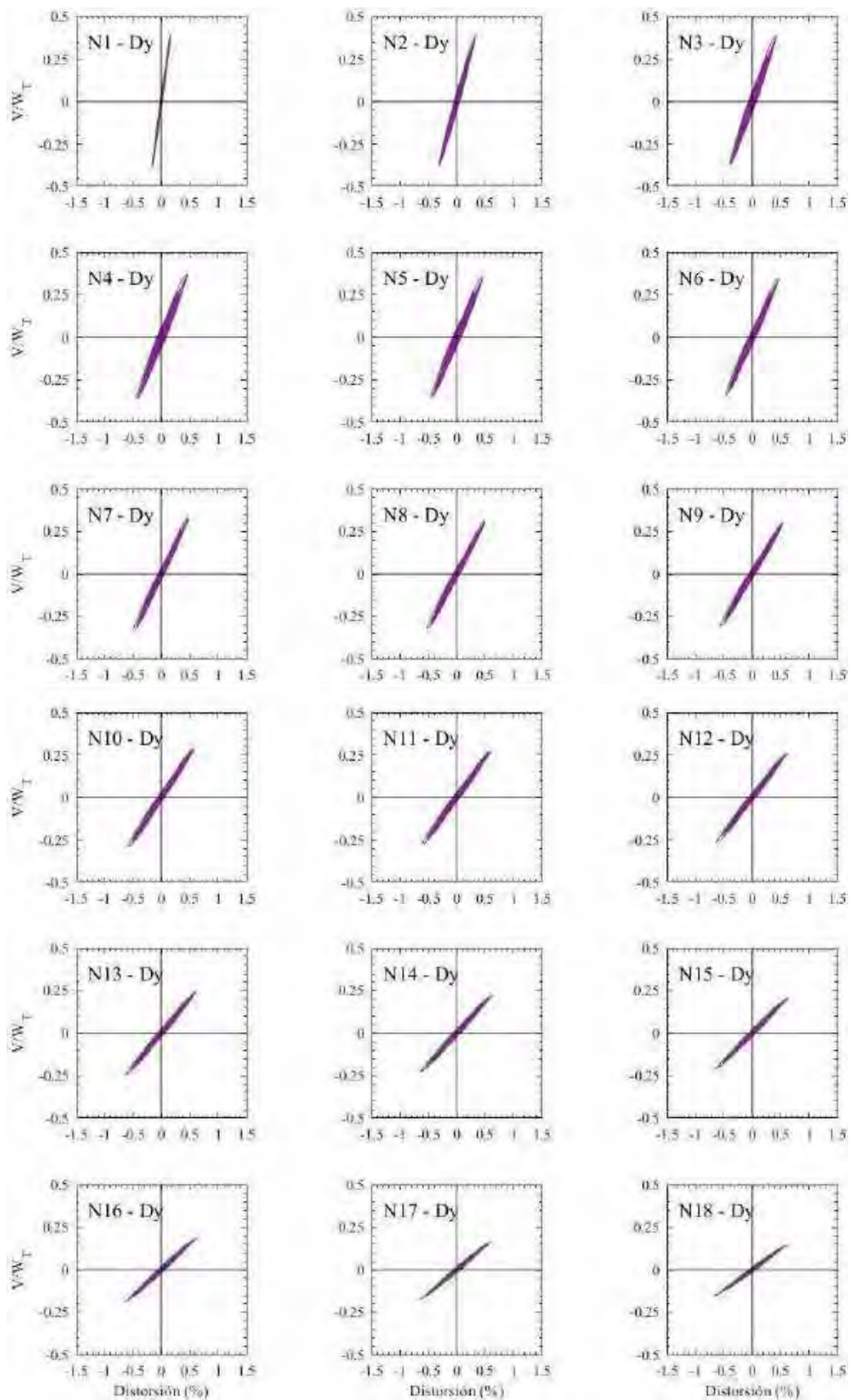


Figura H.53. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración ALAM85-A



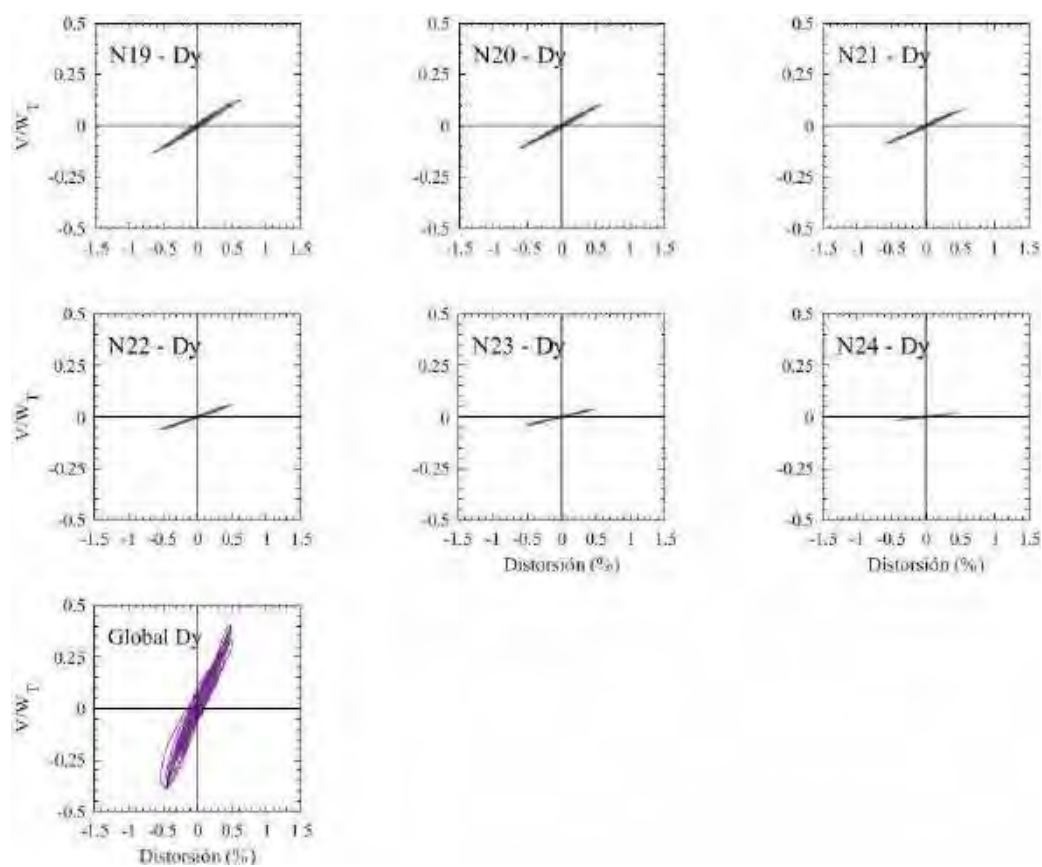
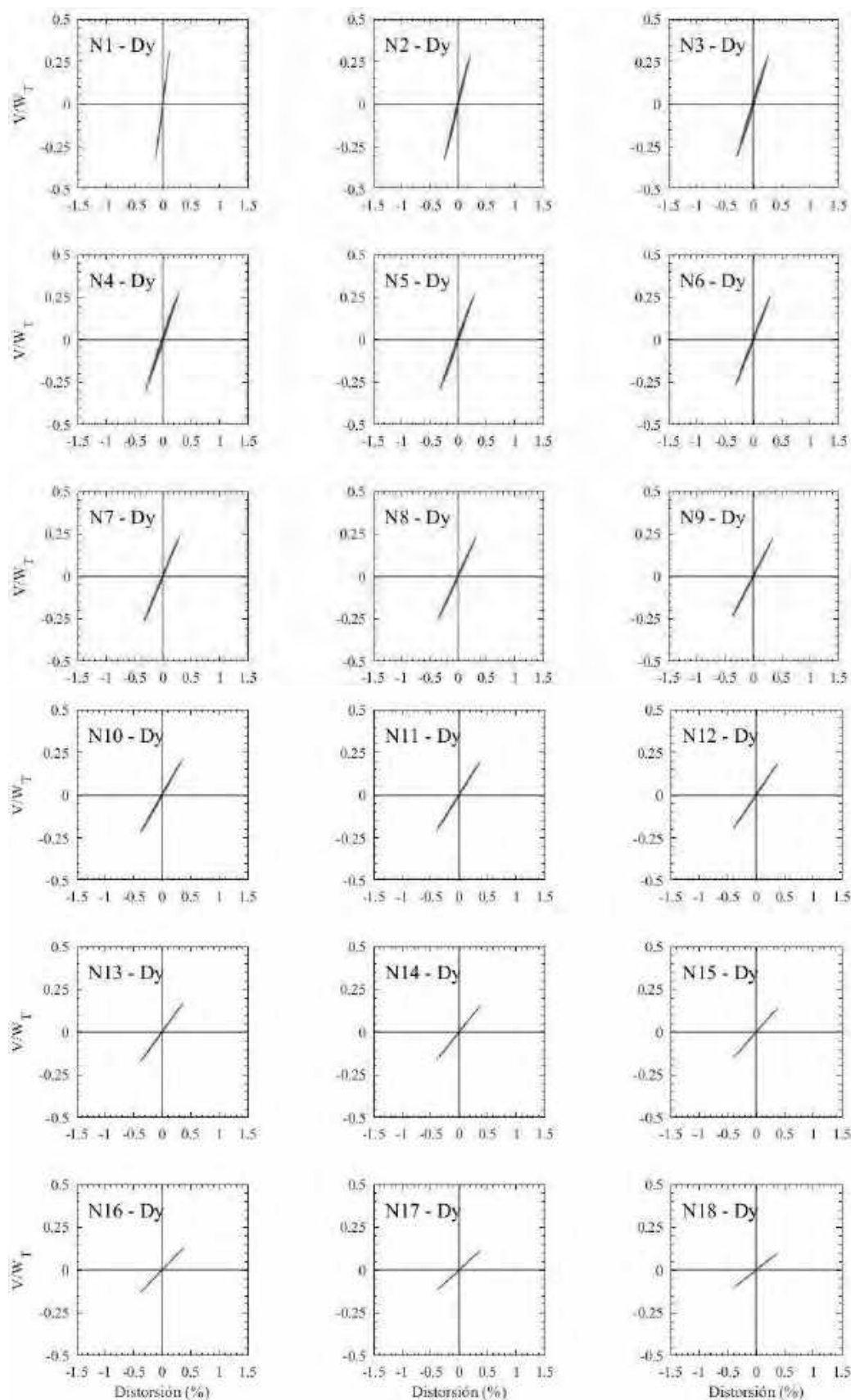


Figura H.54. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración ALAM85-B



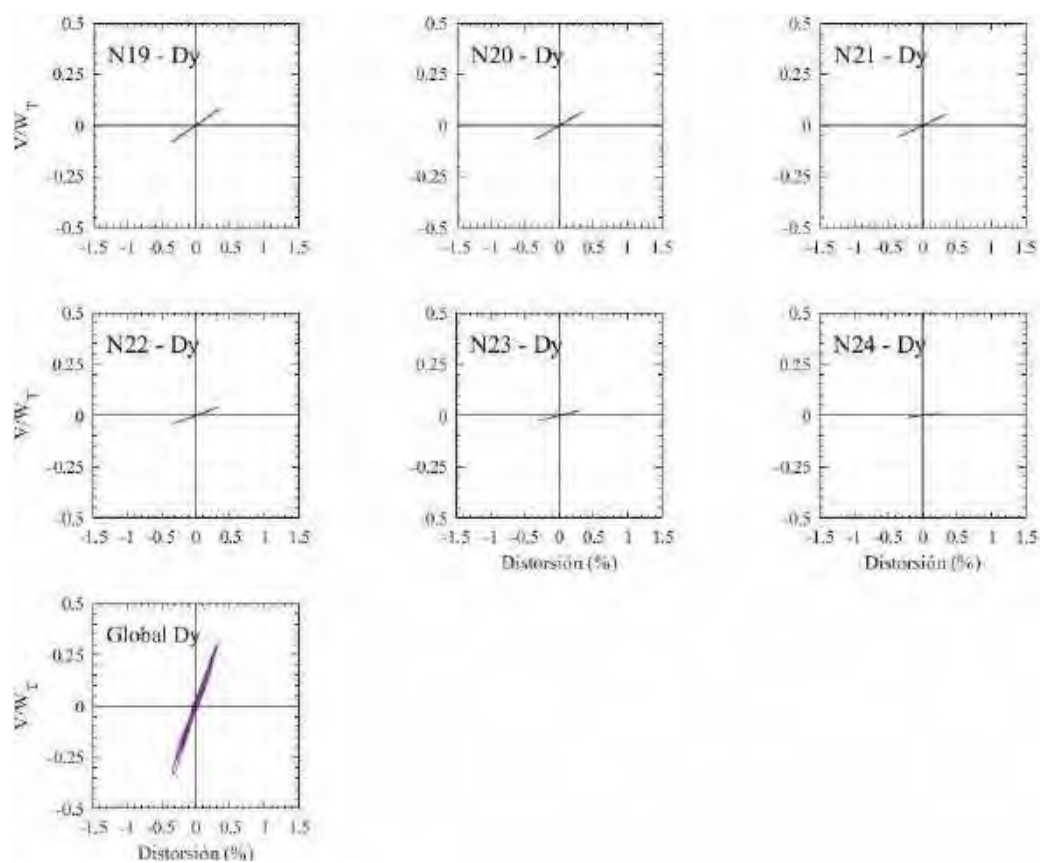
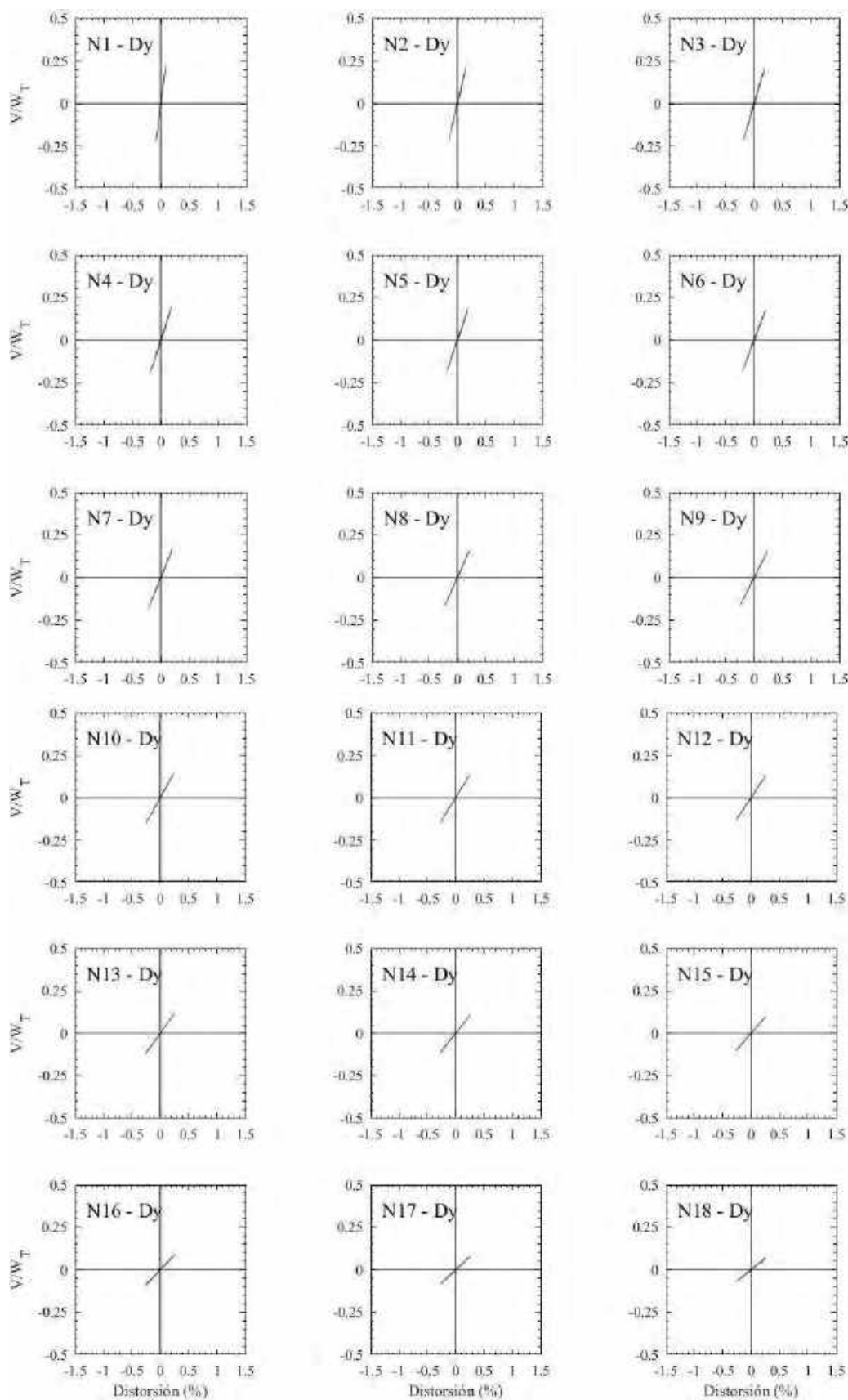


Figura H.55. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración TBOM-A (1985)



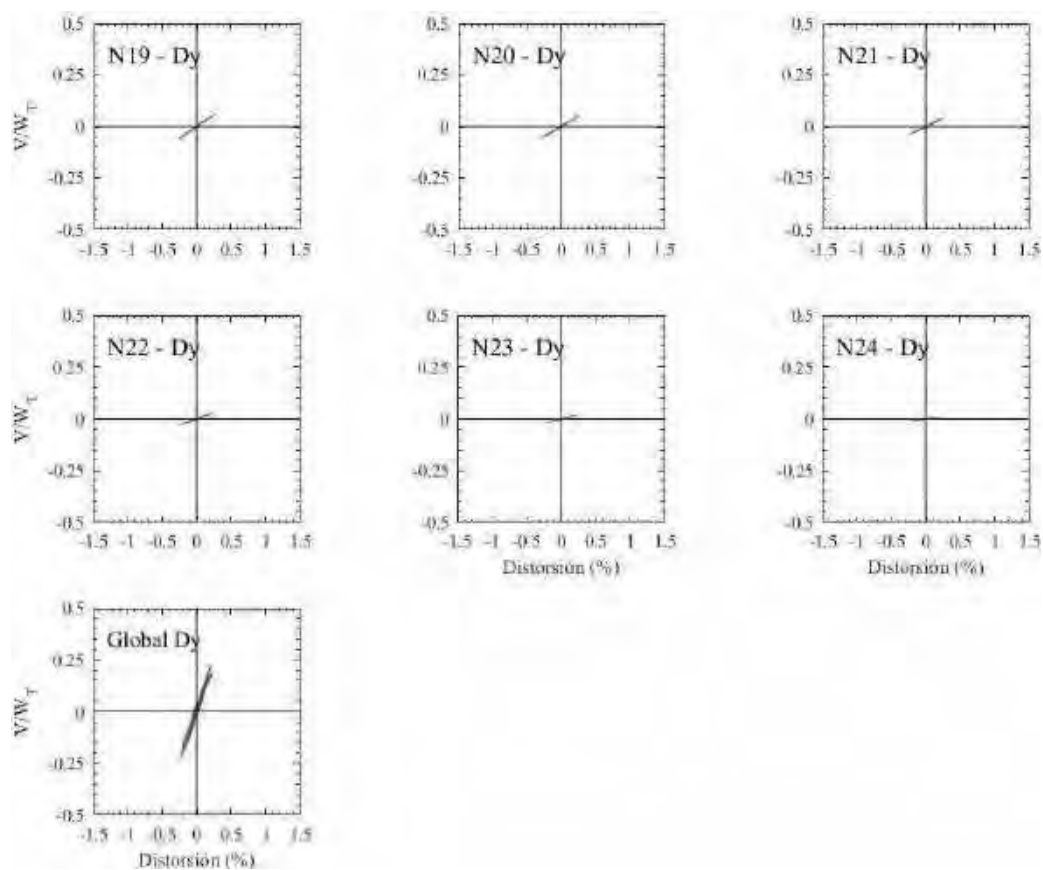
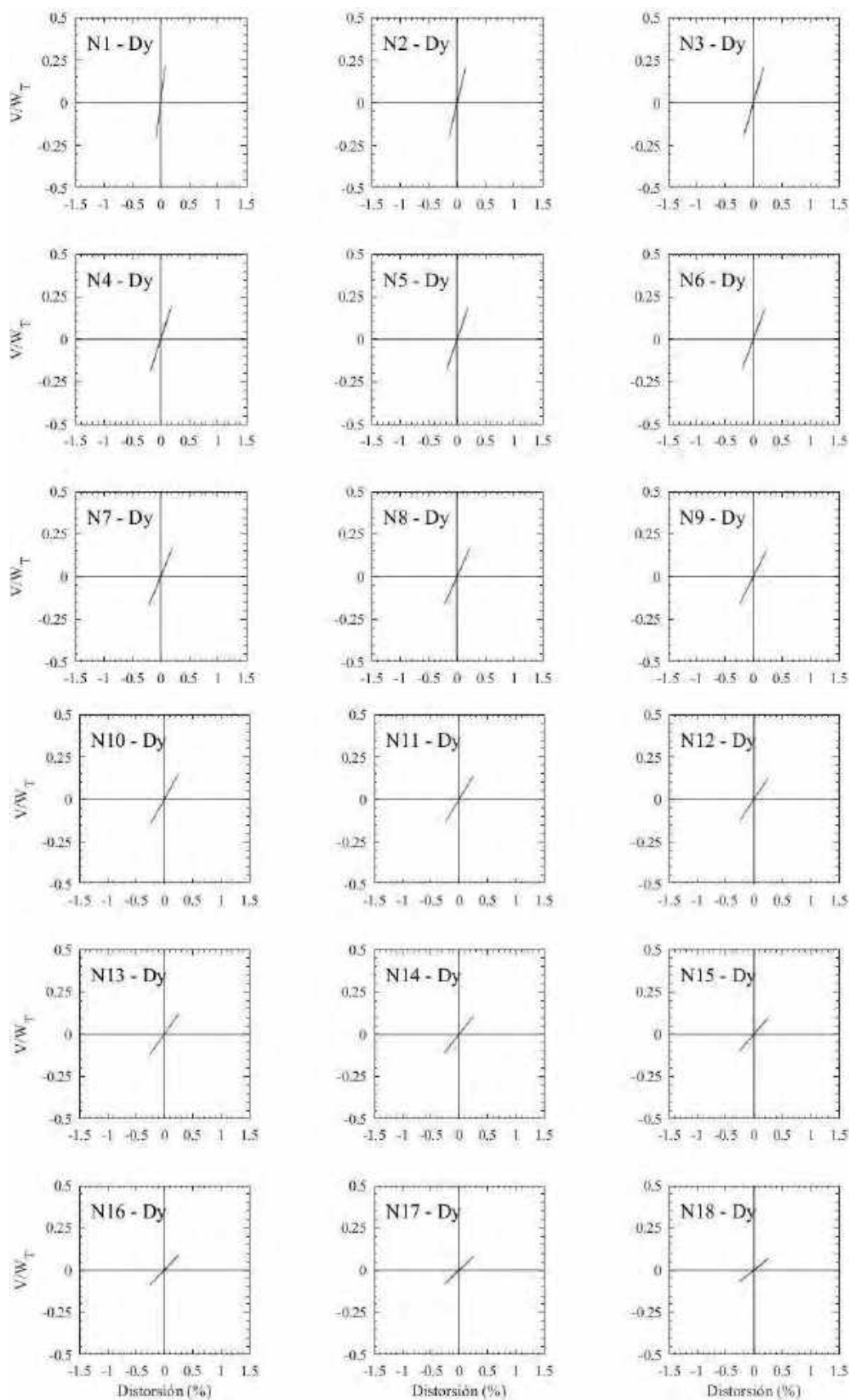


Figura H.56. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración TBOM –B (1985)



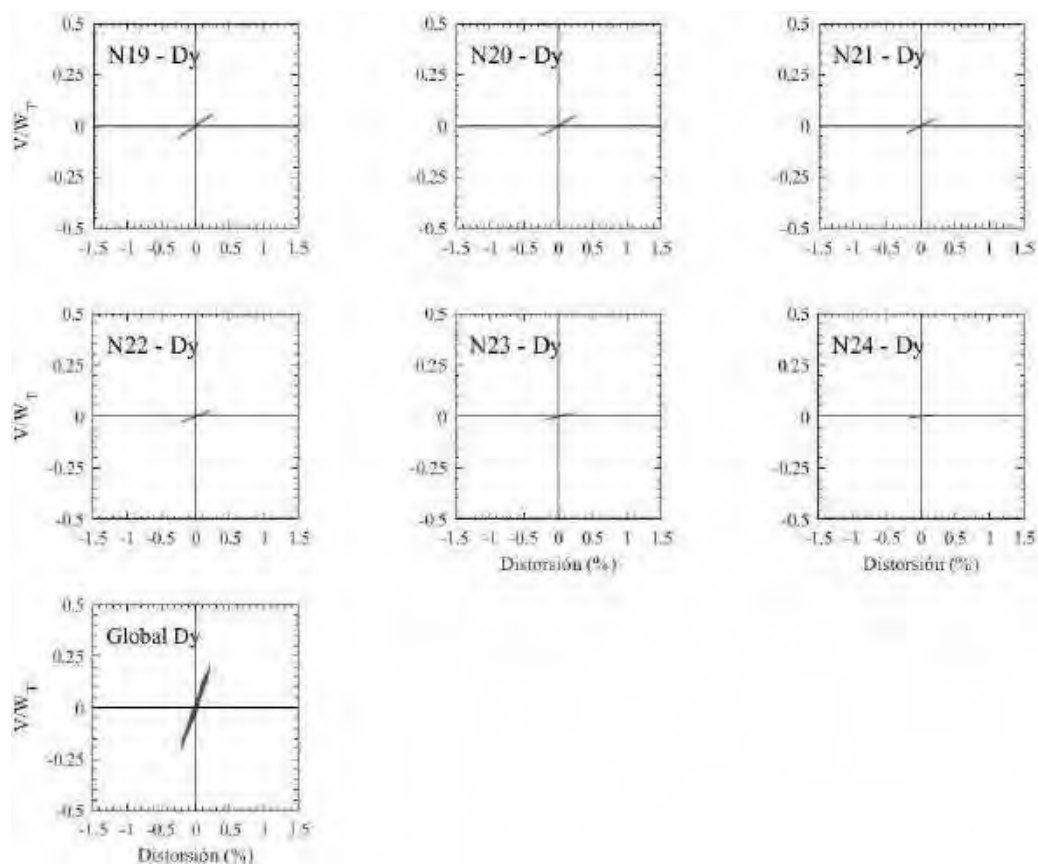
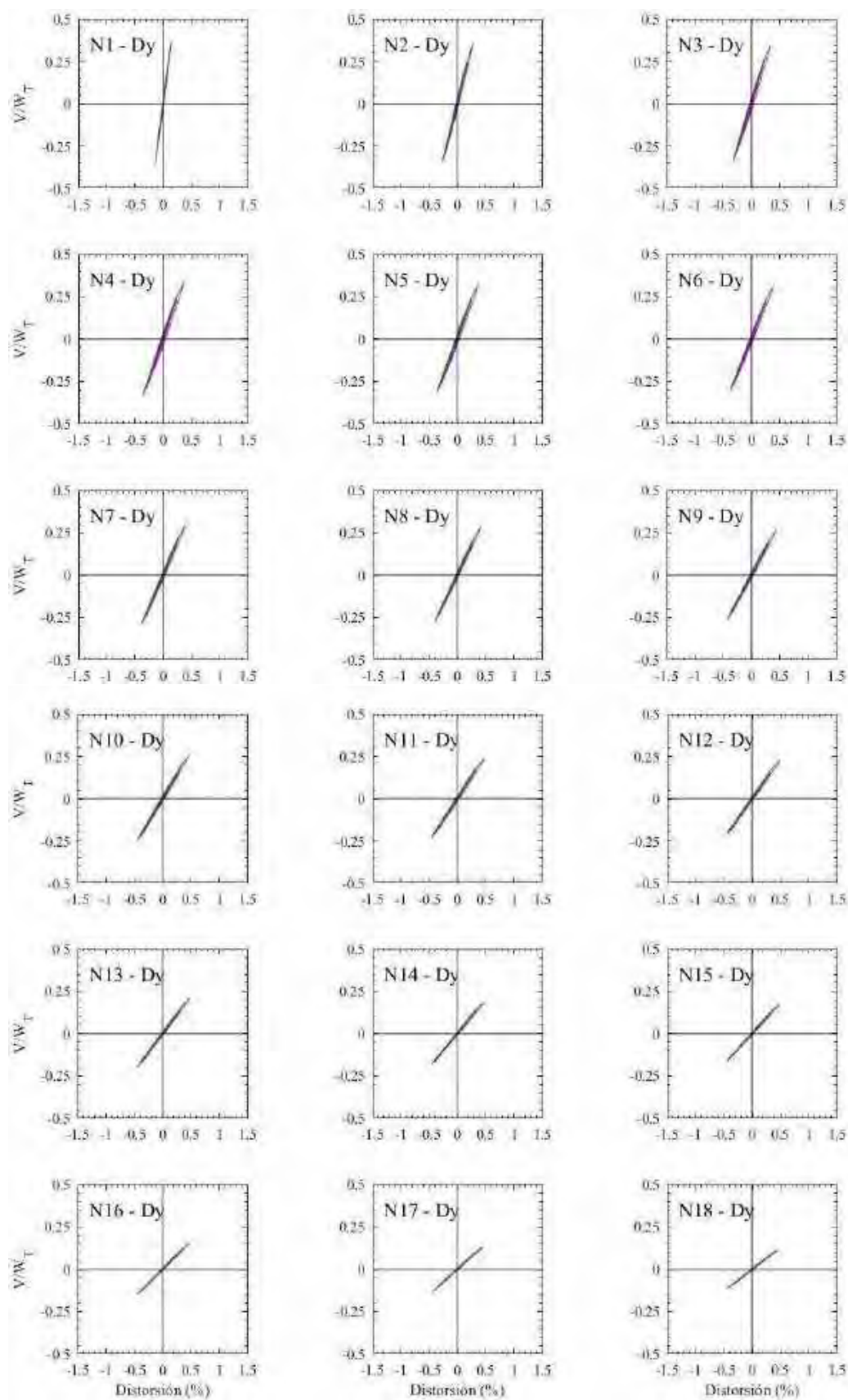


Figura H.57. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración SCT185-A (1985)



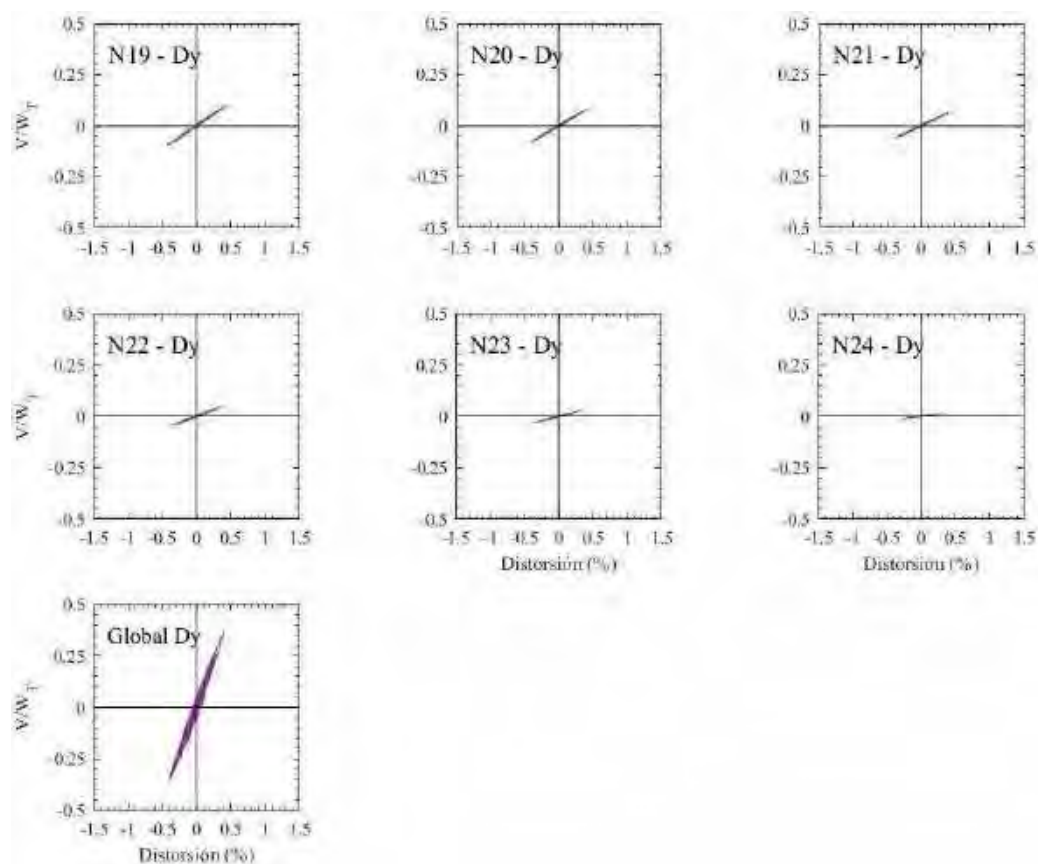
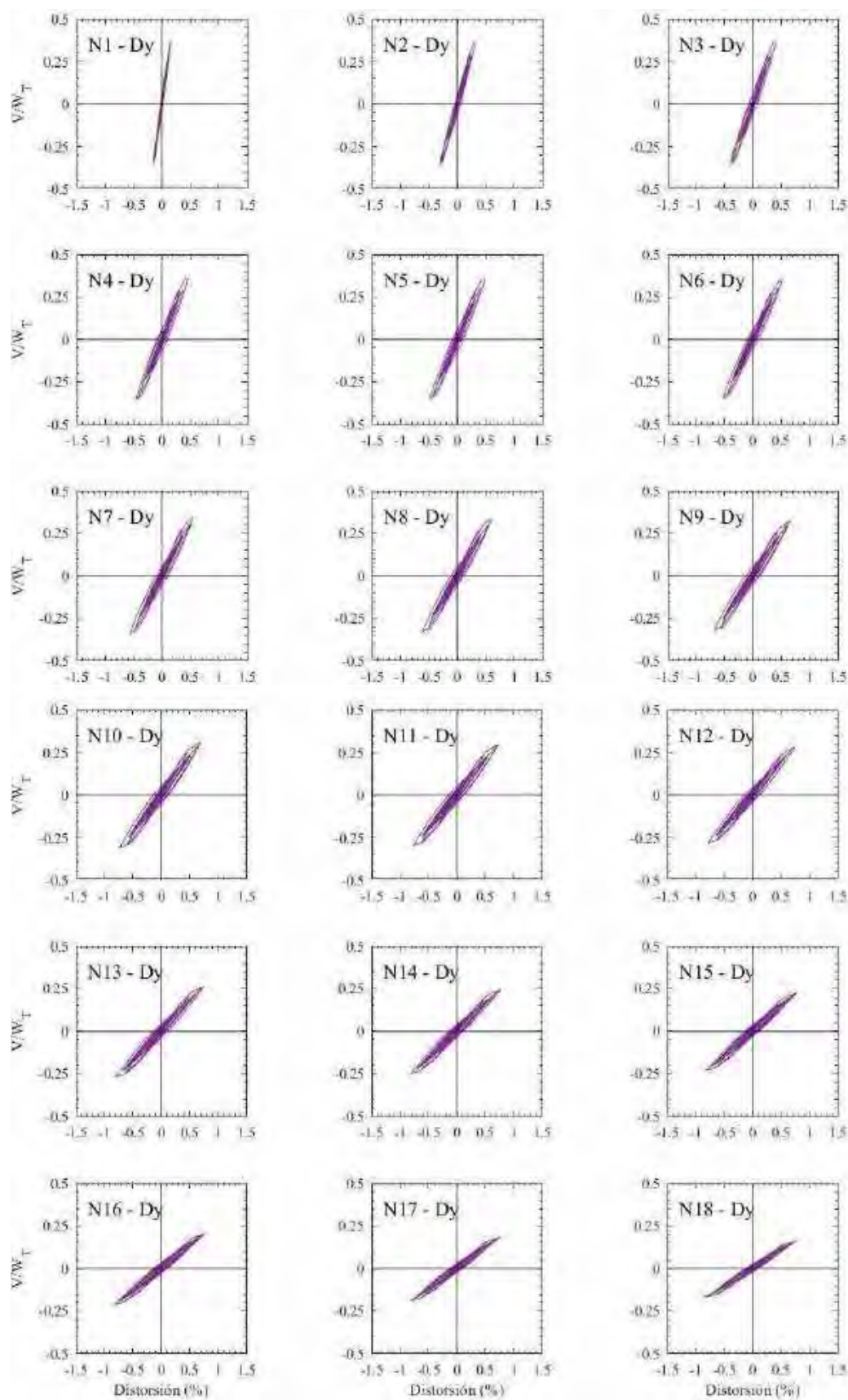


Figura H.58. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración SCT185-B (1985)



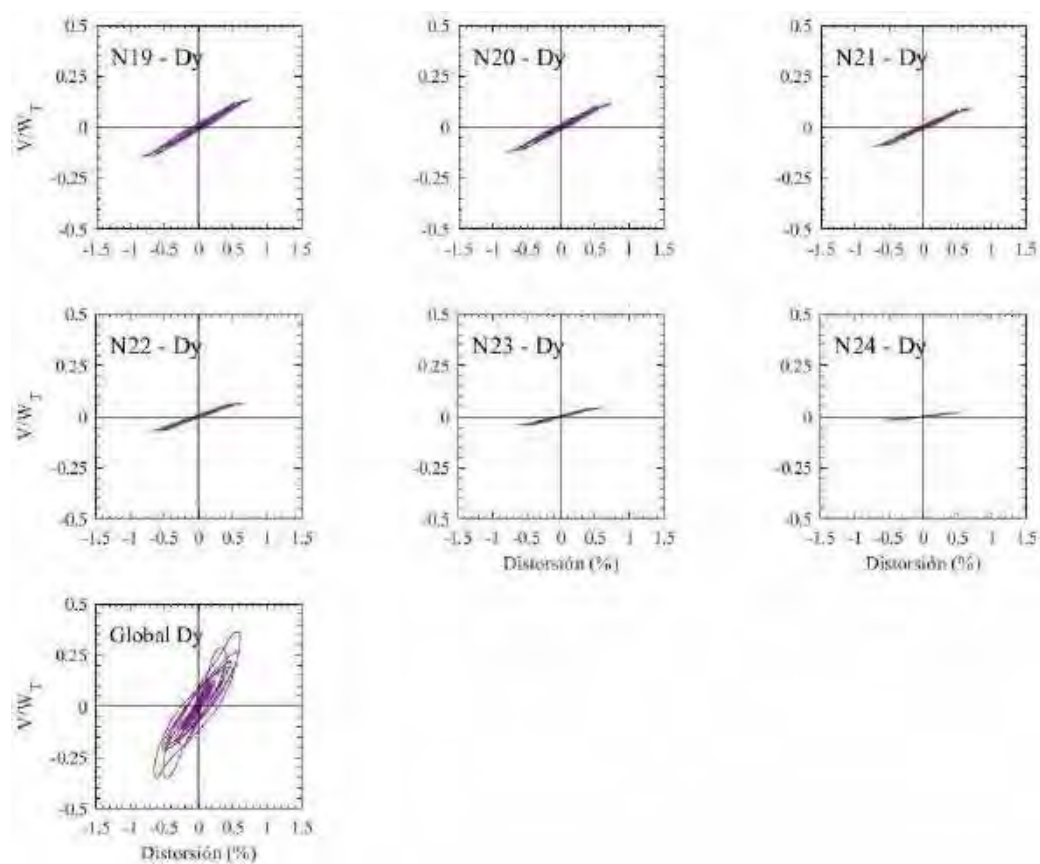
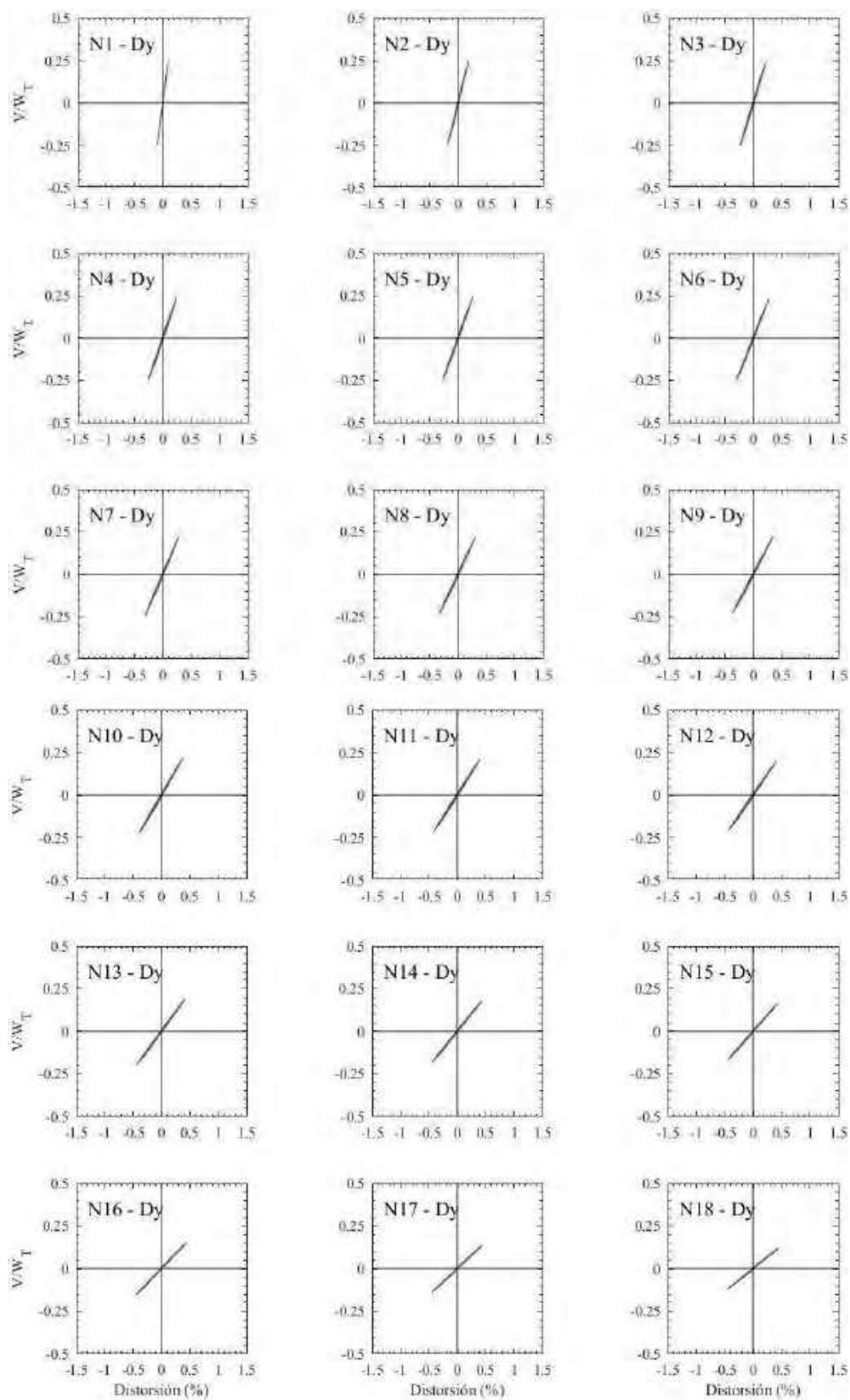


Figura H.59. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección y, registros de aceleración CH84-A (2017)



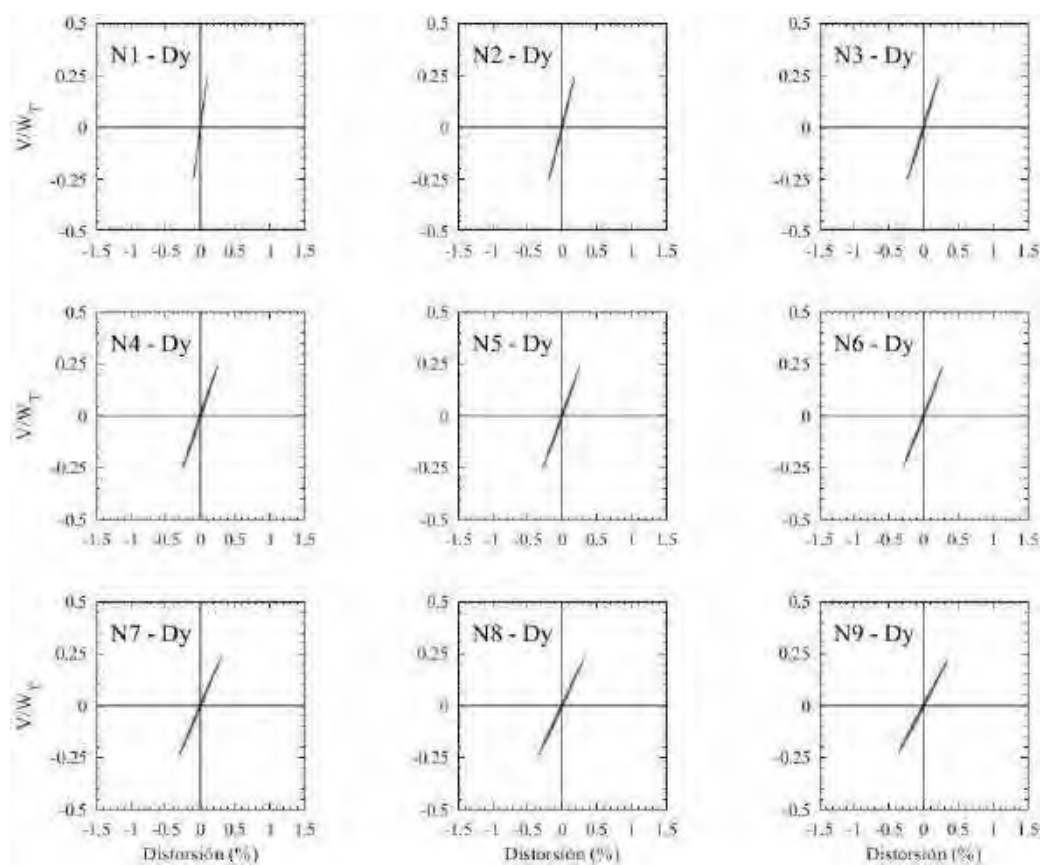
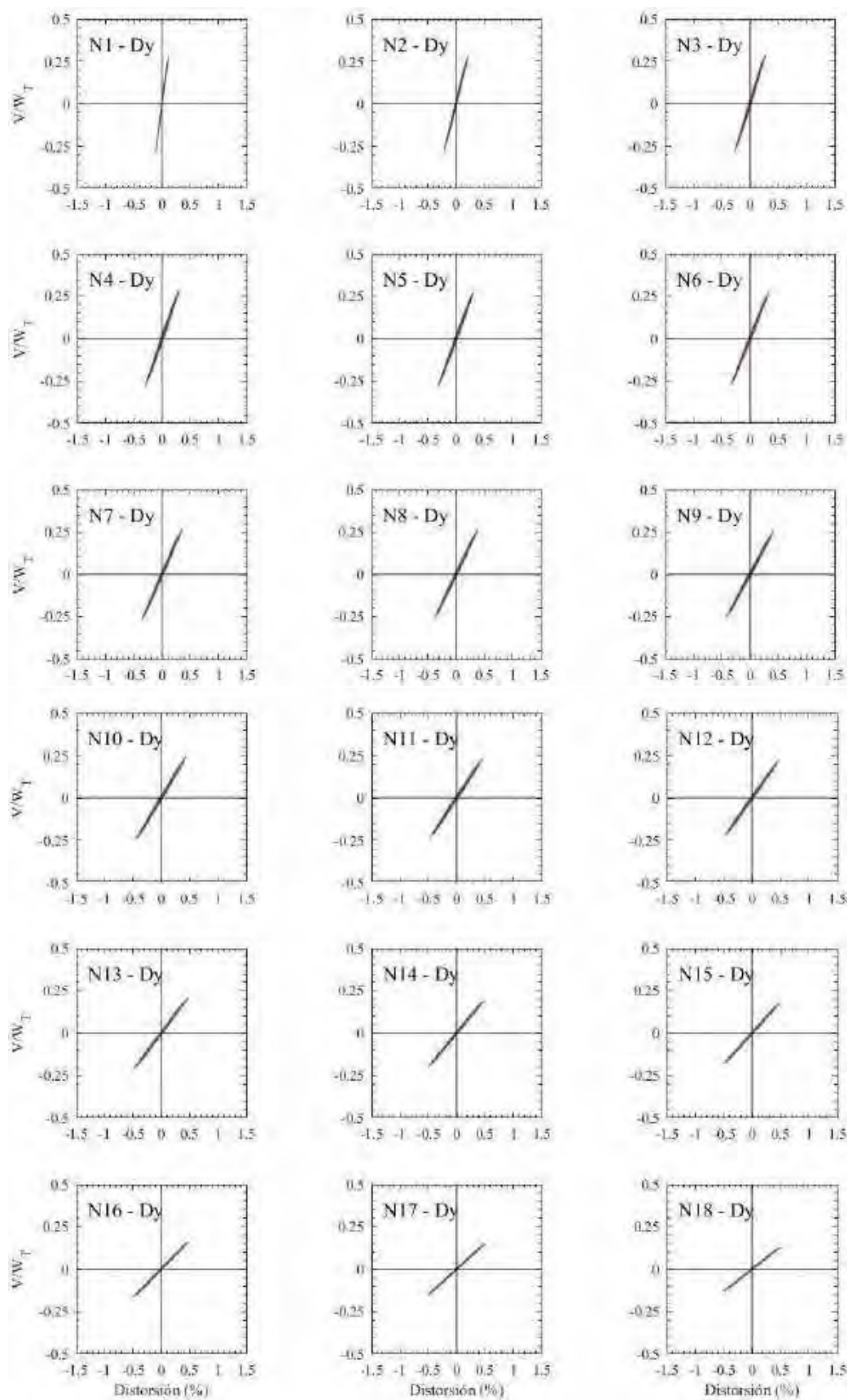


Figura H.60. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CH84-B (2017)



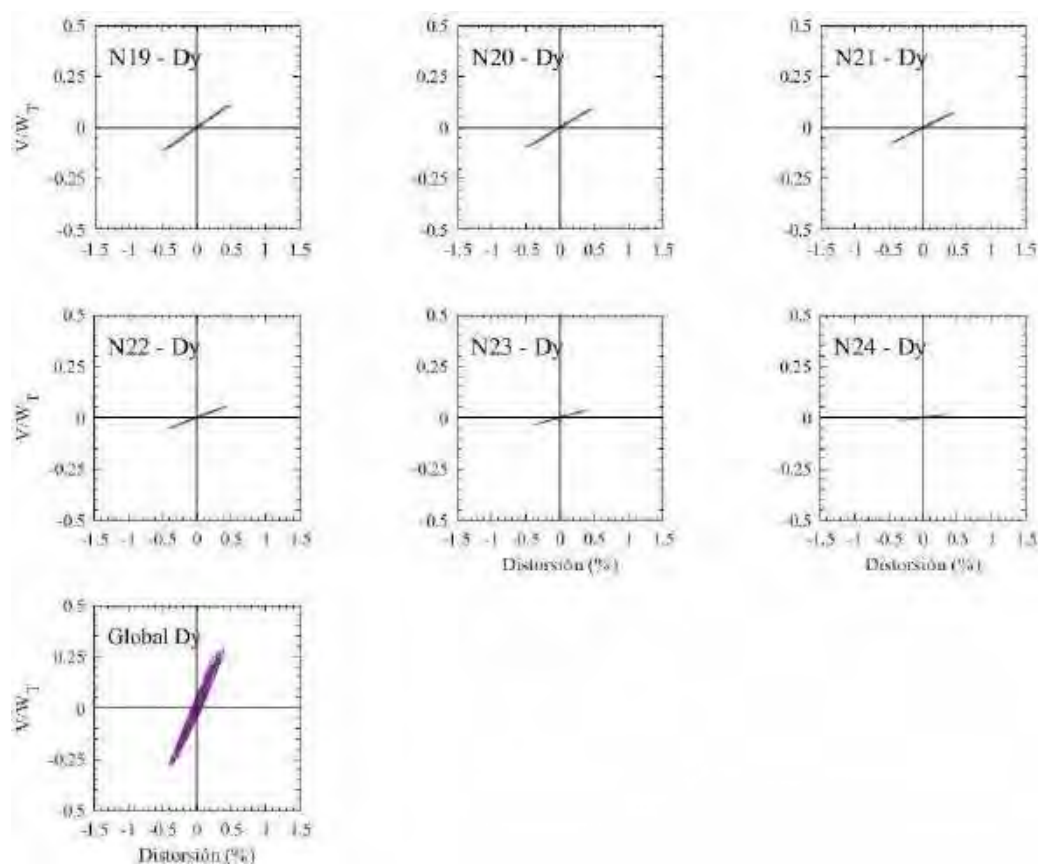
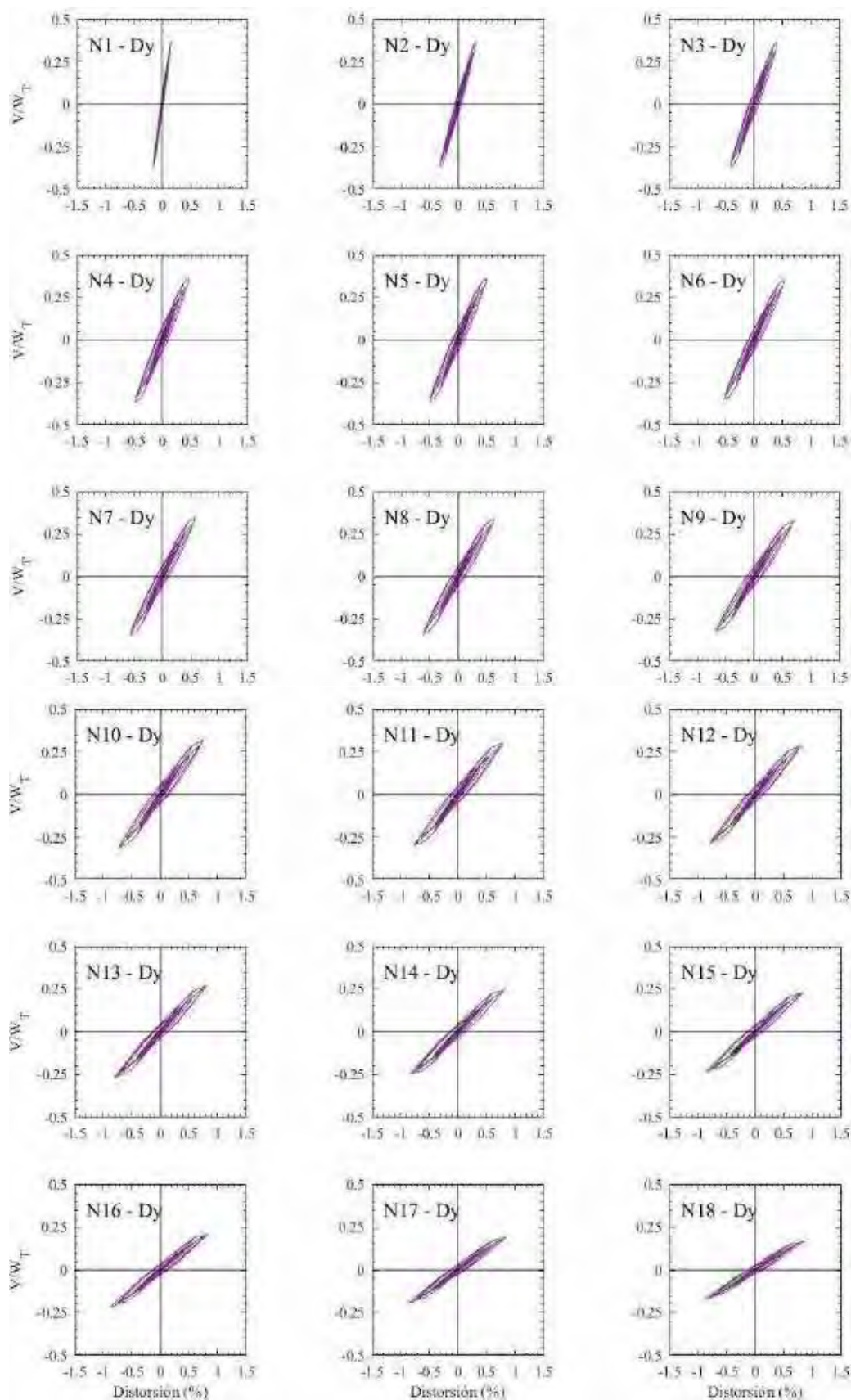


Figura H.61. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración MI15-A (2017)



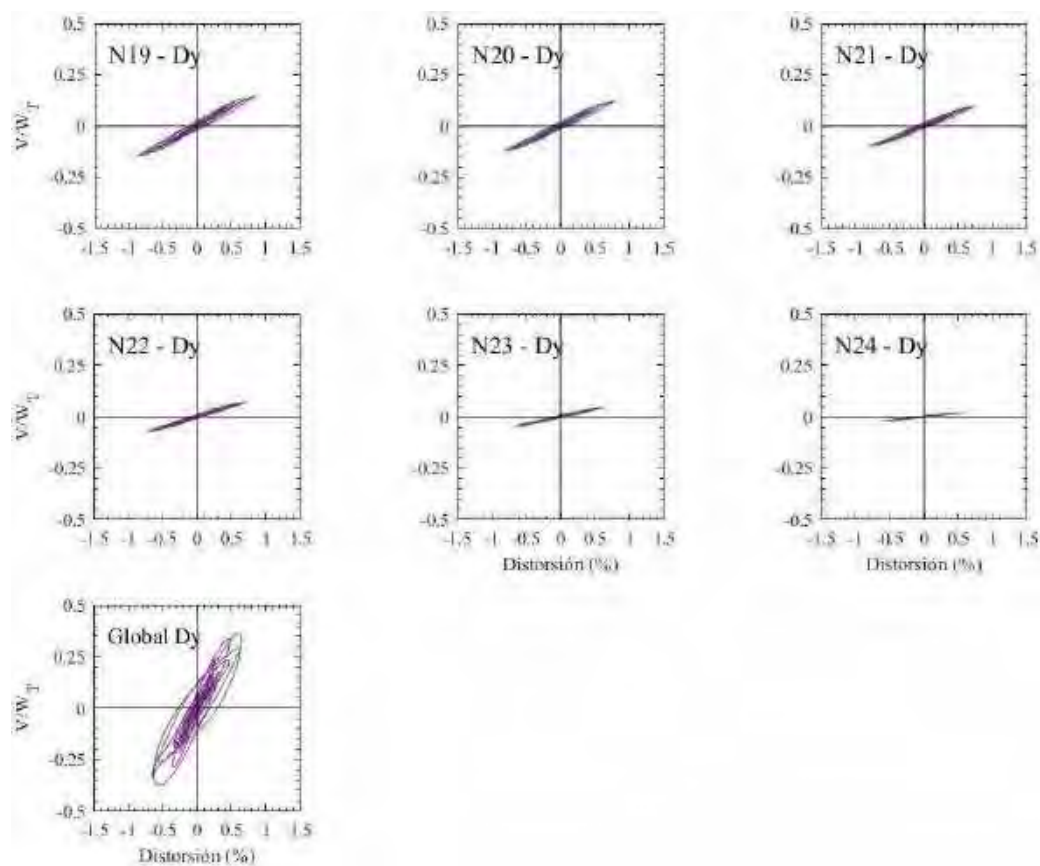
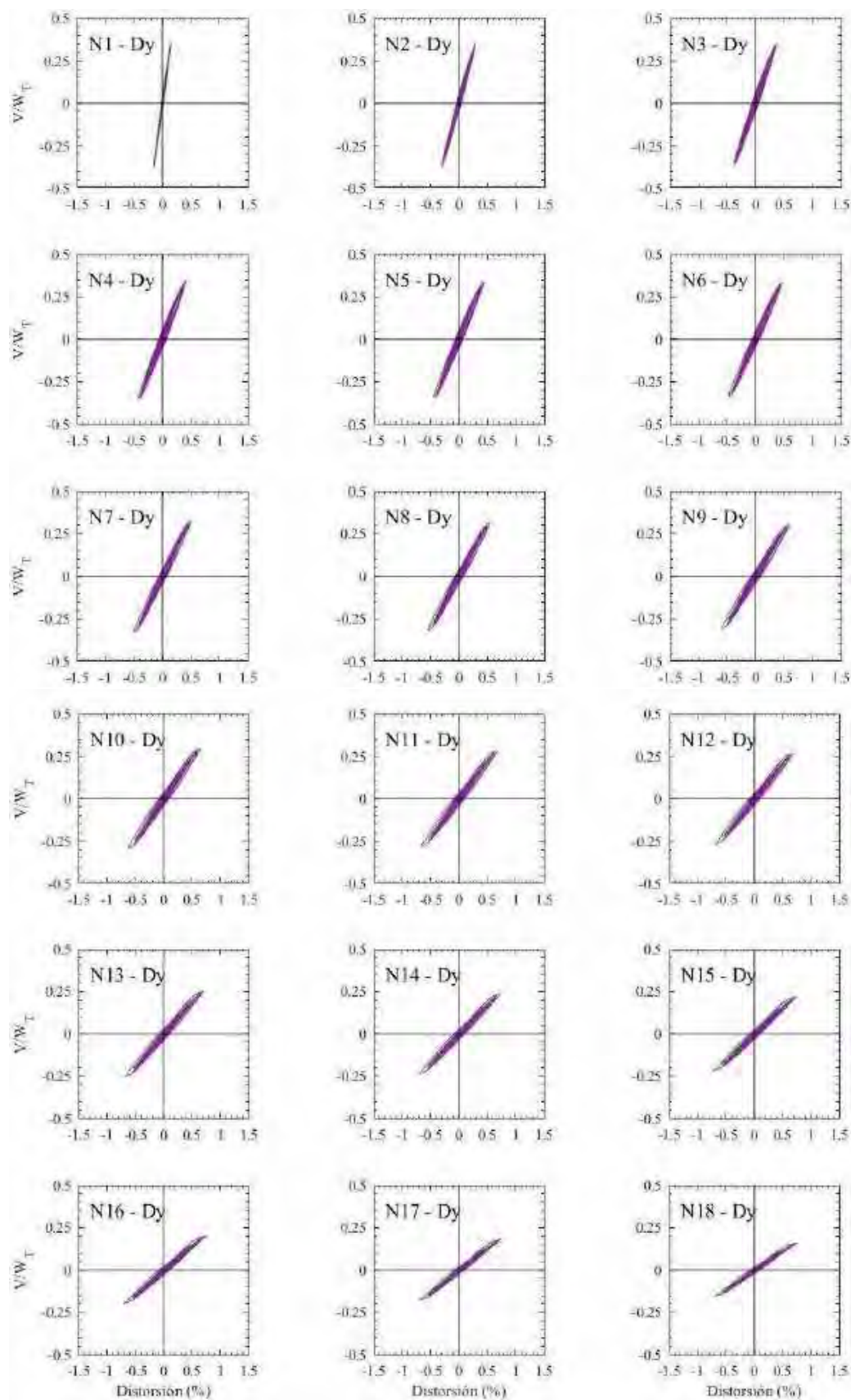


Figura H.62. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración MI15-B (2017)



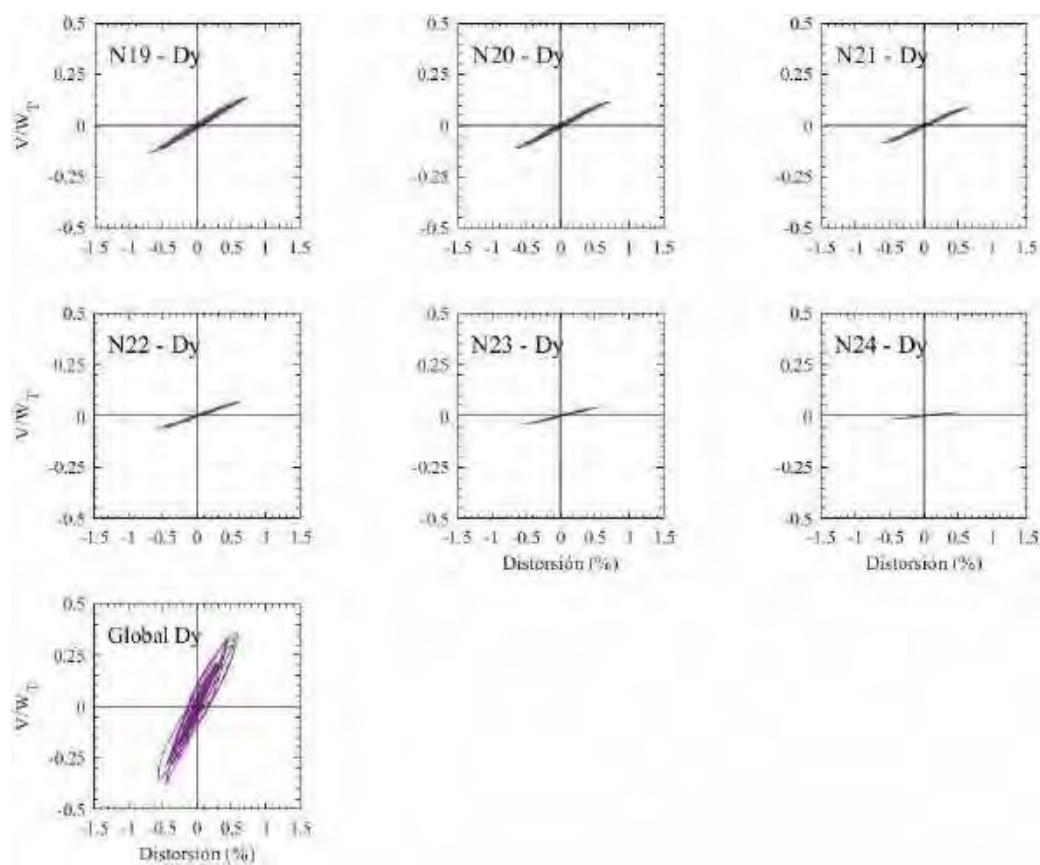
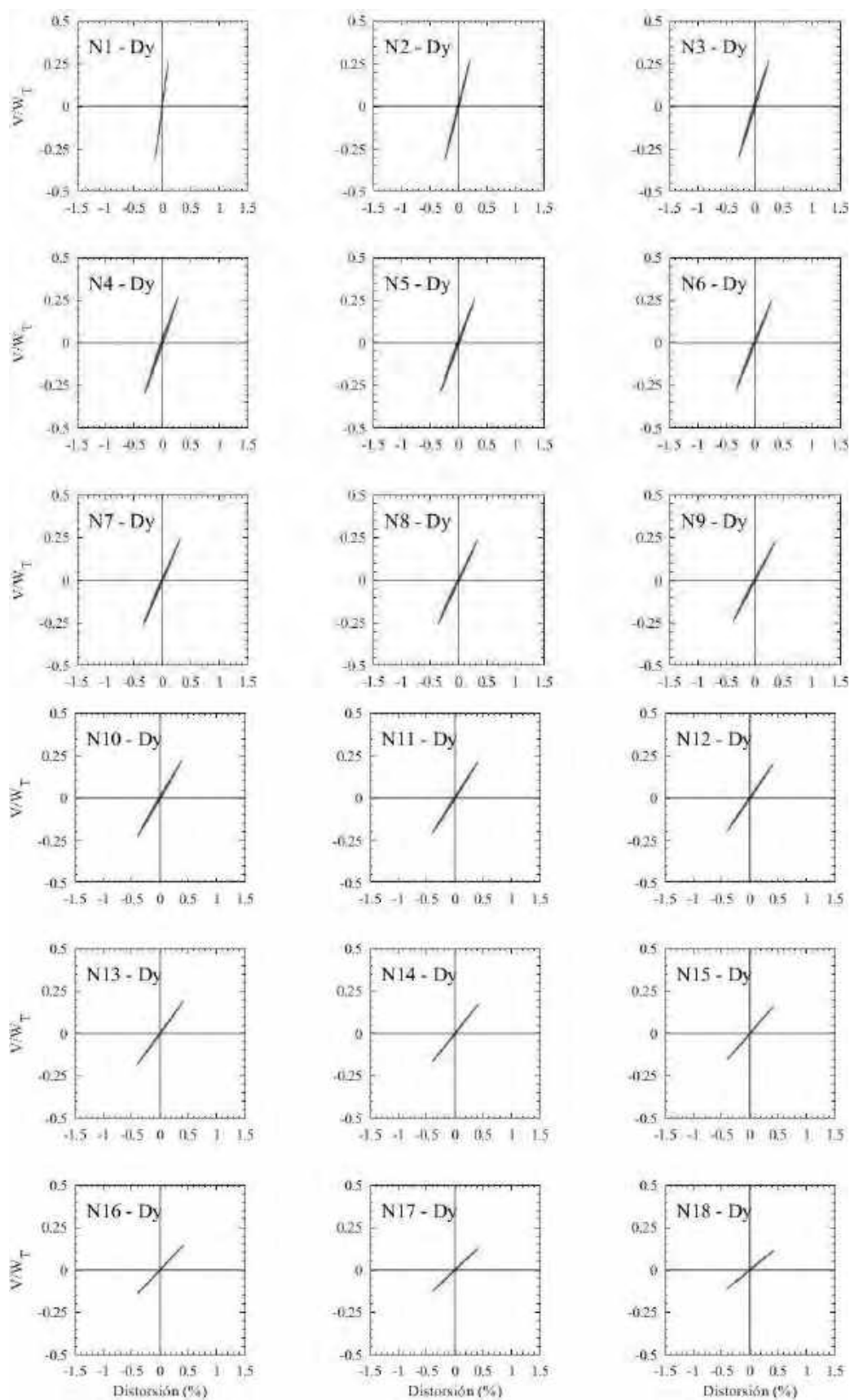


Figura H.63. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración XO36-A (2017)



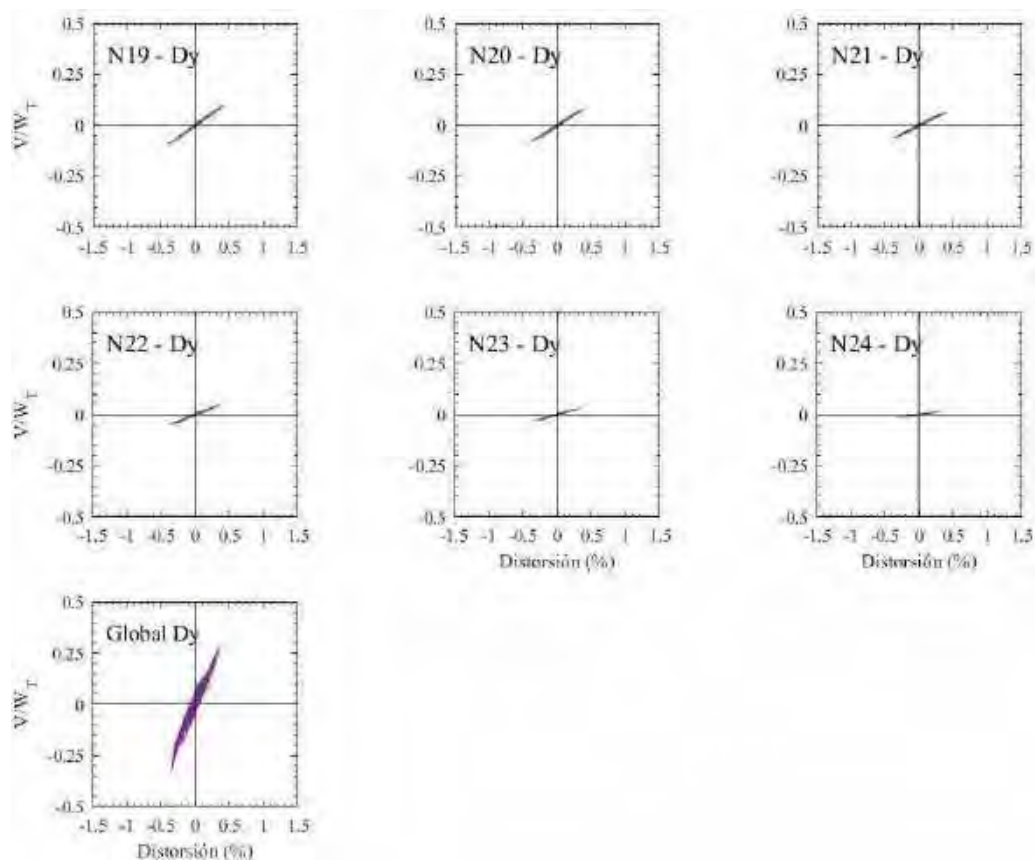


Figura H.64. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.1.5 Mapeos de fluencia en dirección x

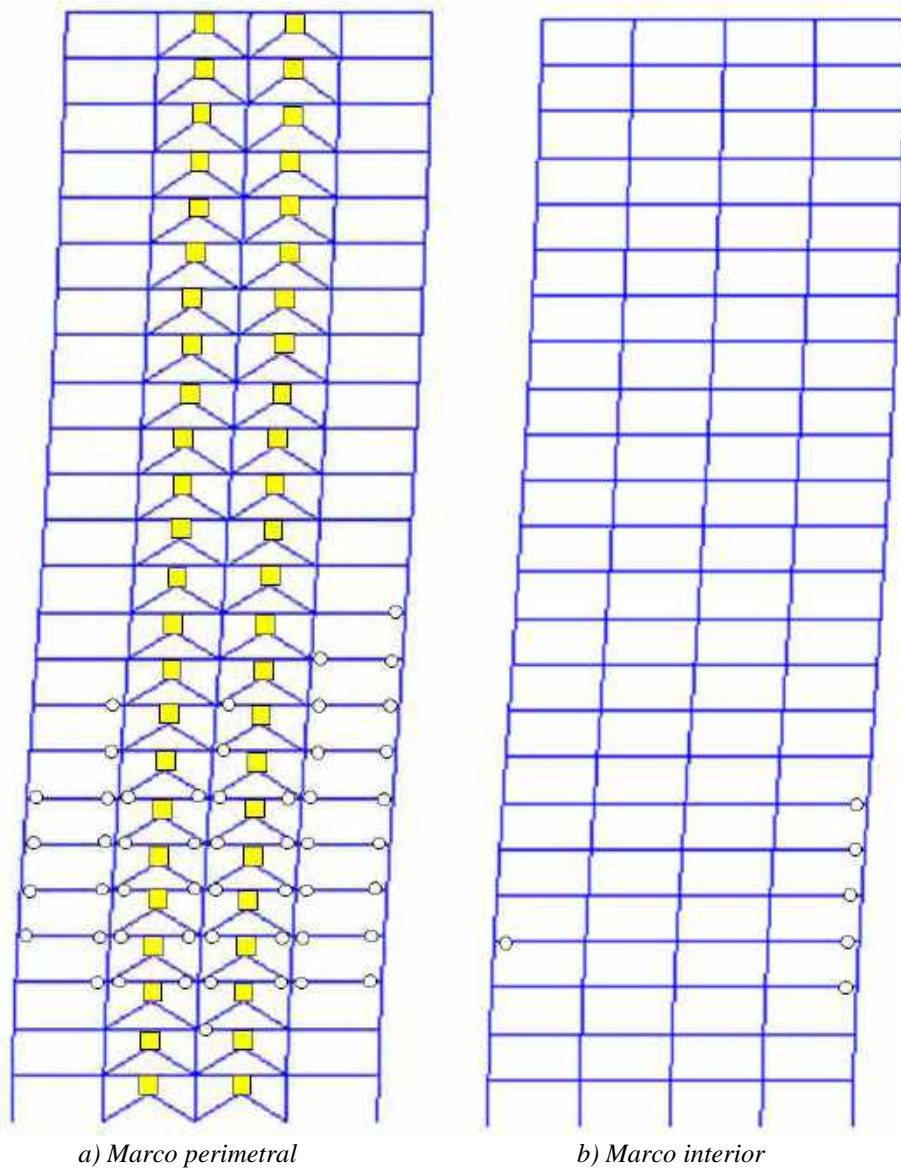
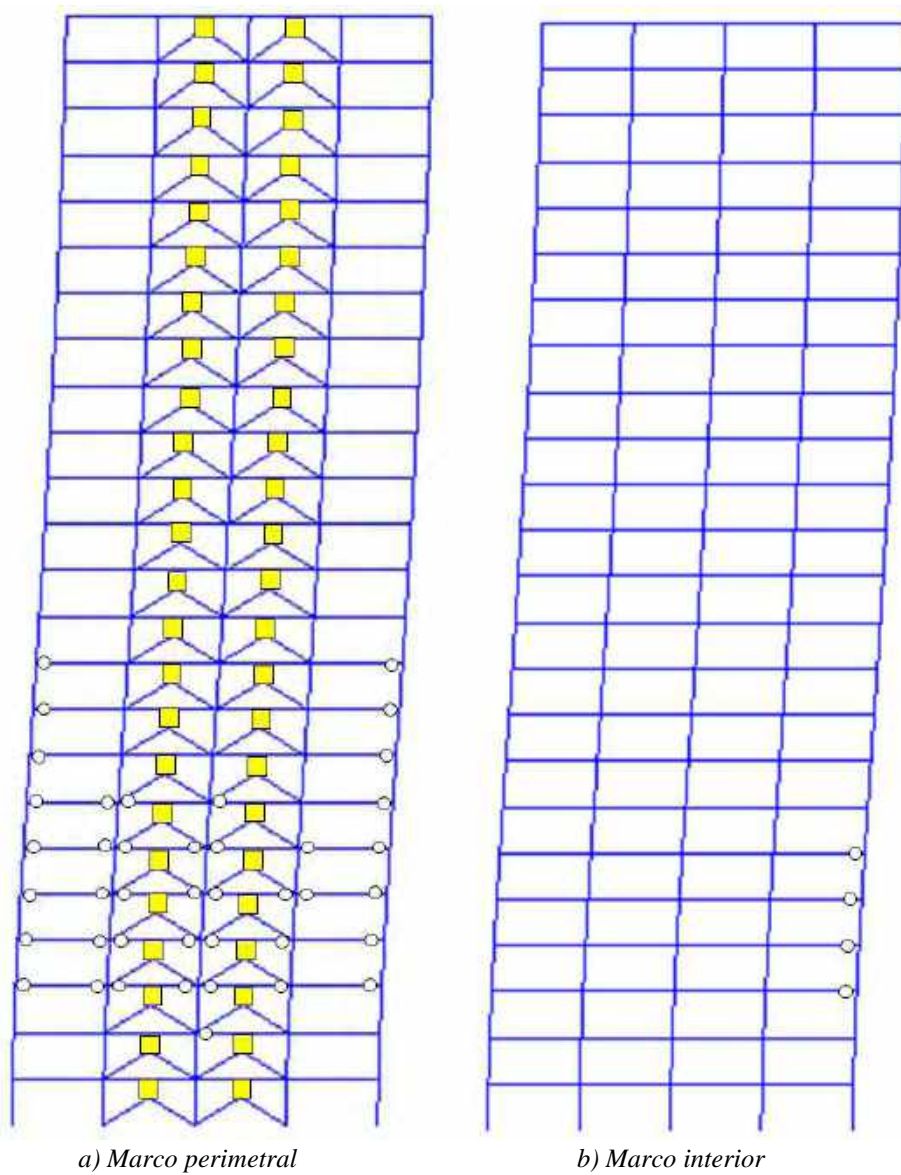
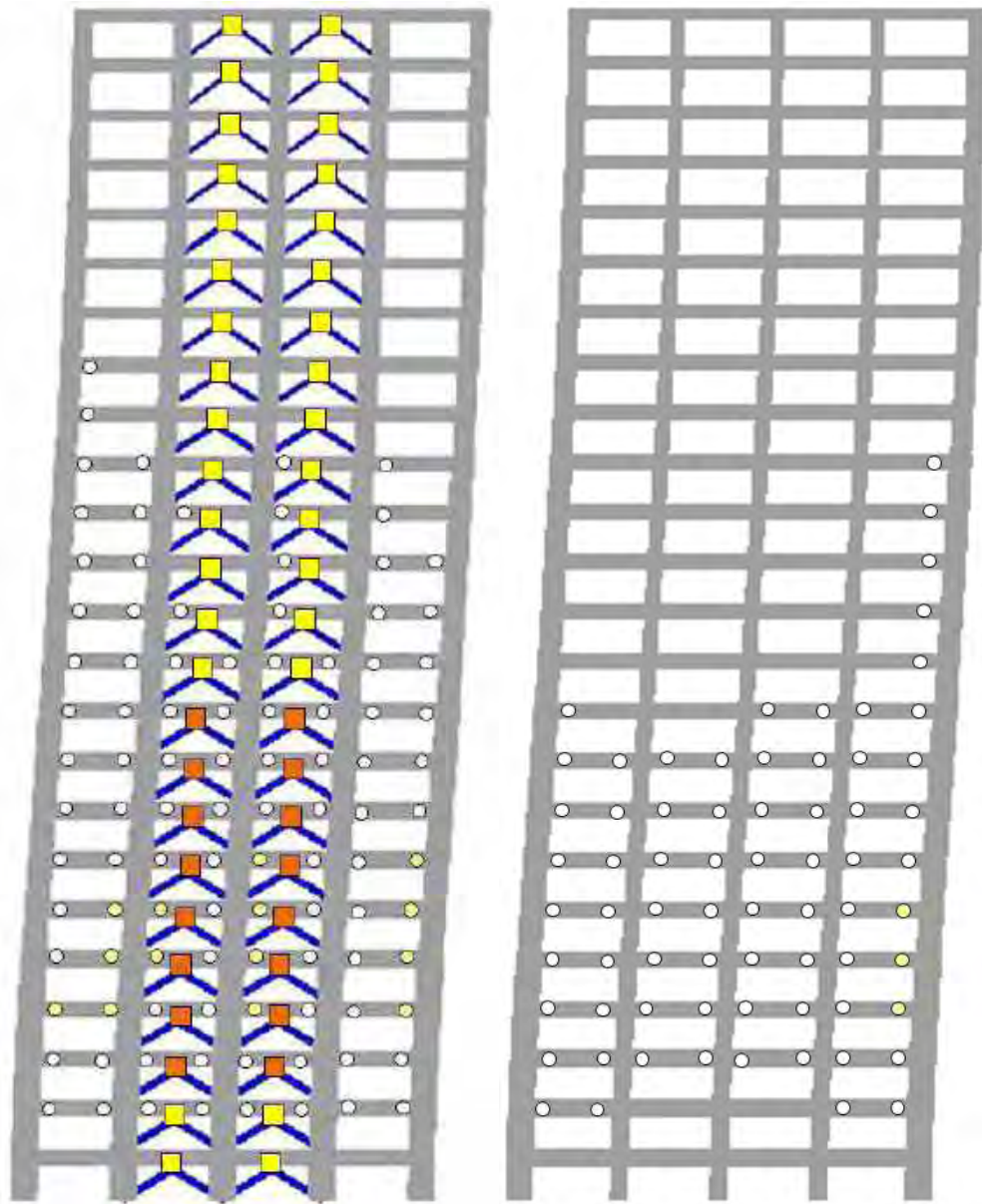


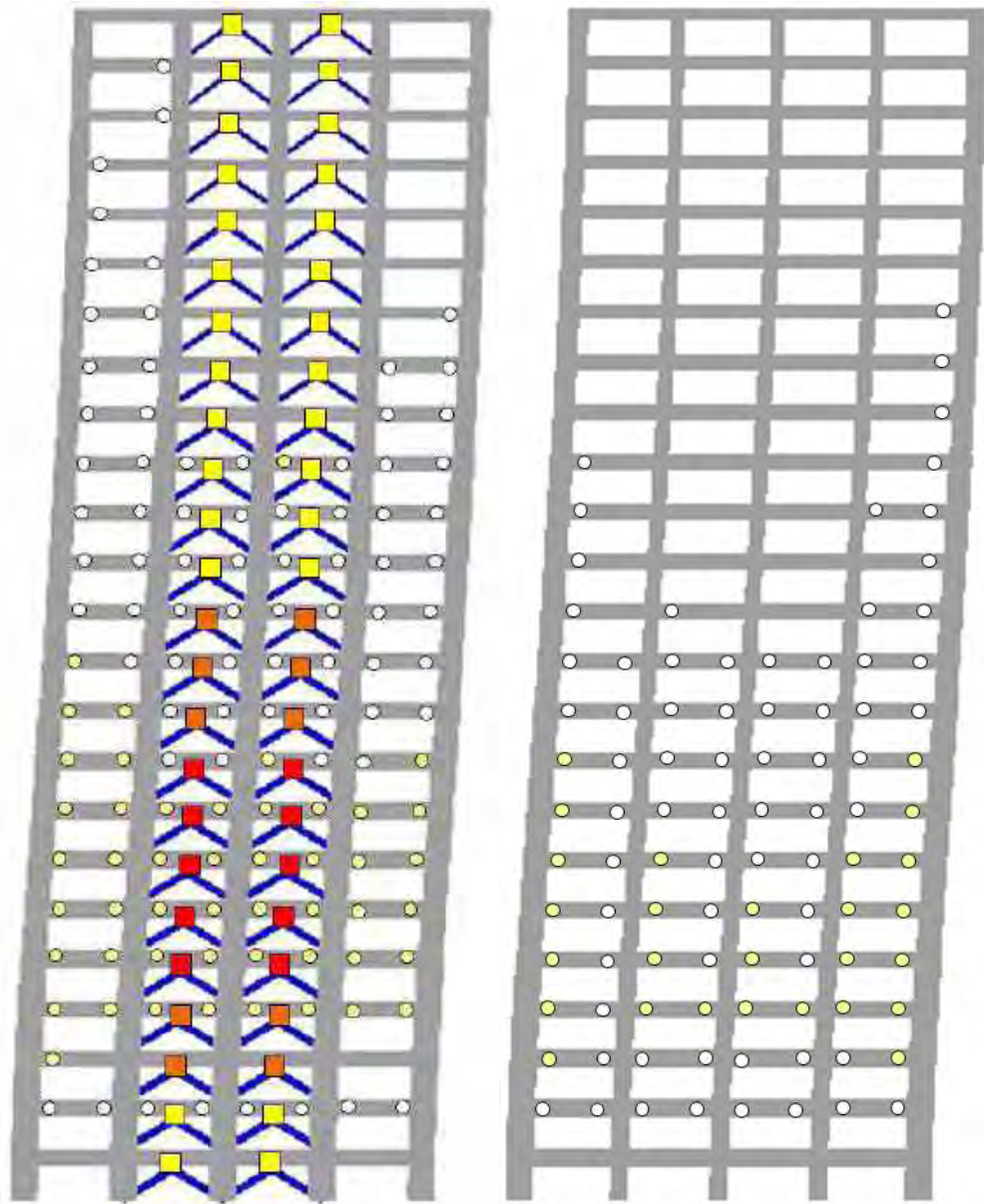
Figura H.65. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TL08-A



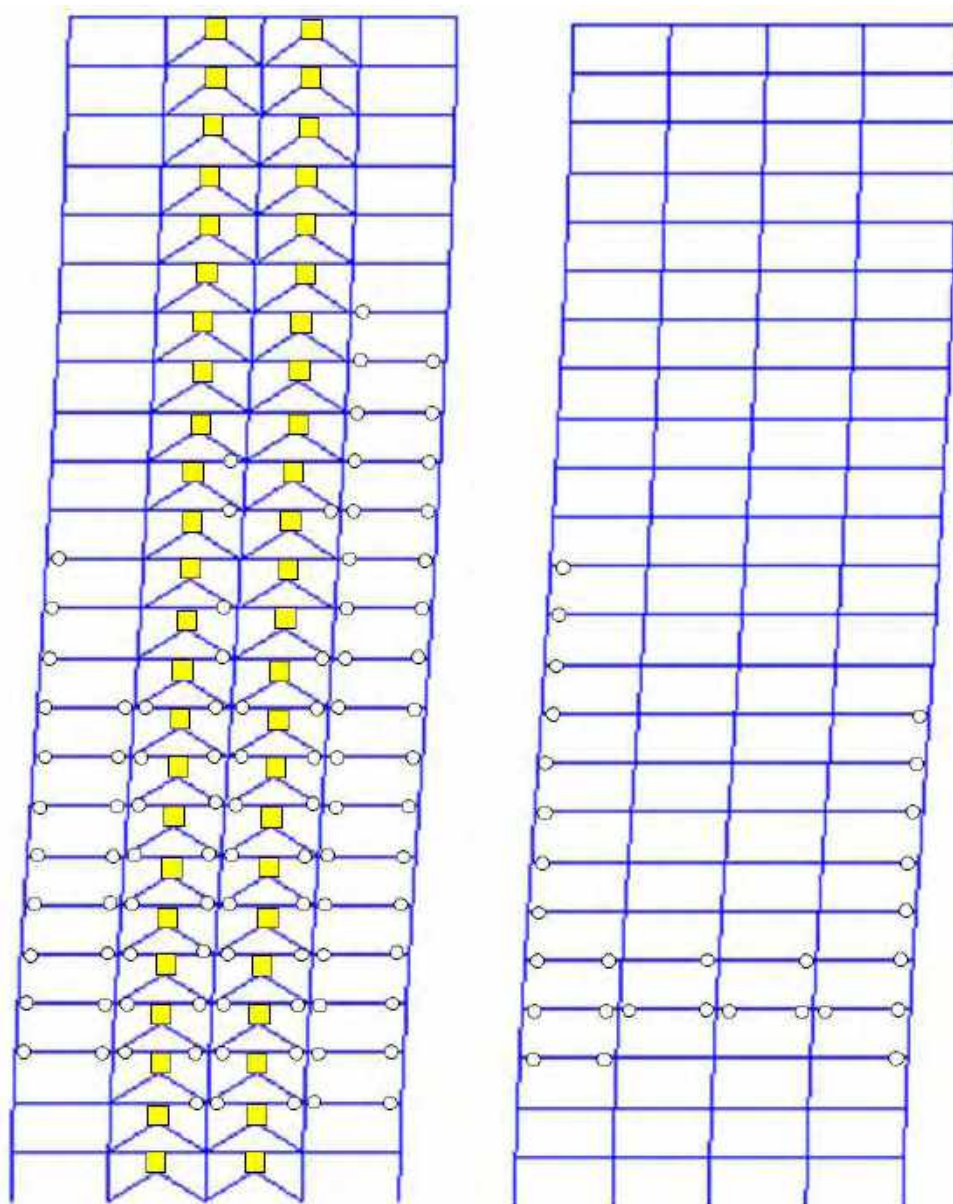
a) Marco perimetral
b) Marco interior
Figura H.66. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TL08-B



a) Marco perimetral b) Marco interior
 Figura H.67. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CJ03-A



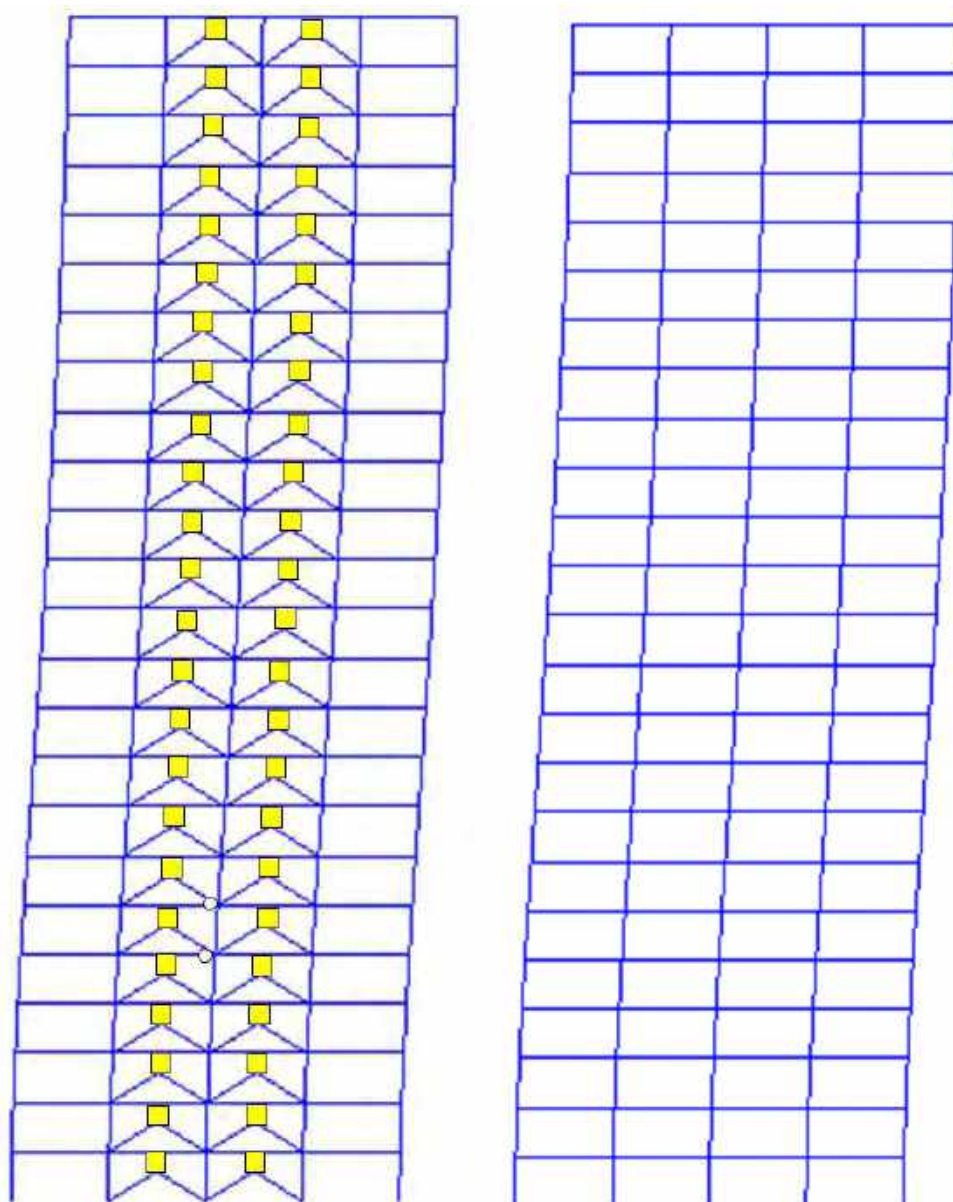
a) Marco perimetral
 b) Marco interior
 Figura H.68. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CJ03-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

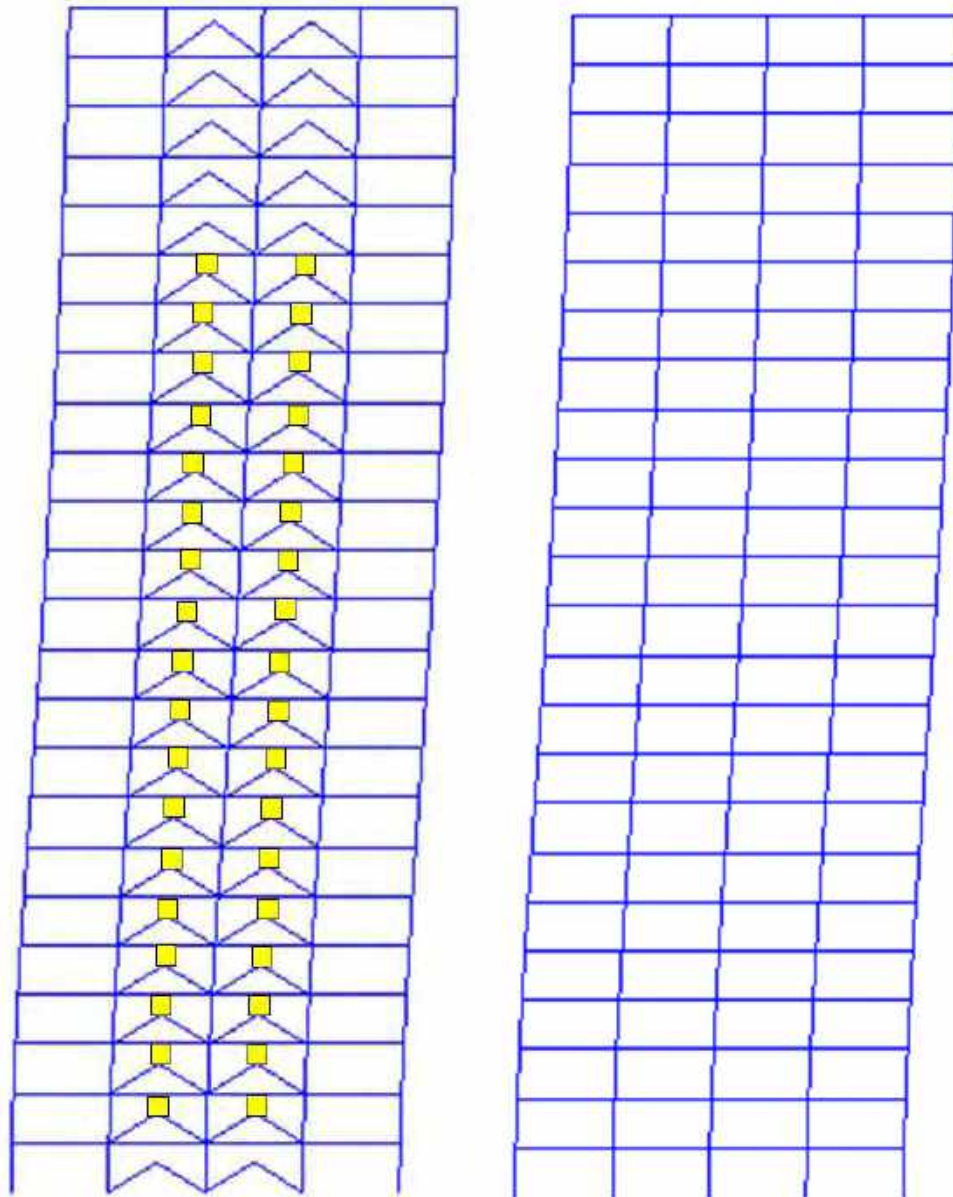
Figura H.69. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración ALAM85-A



a) Marco perimetral

b) Marco interior

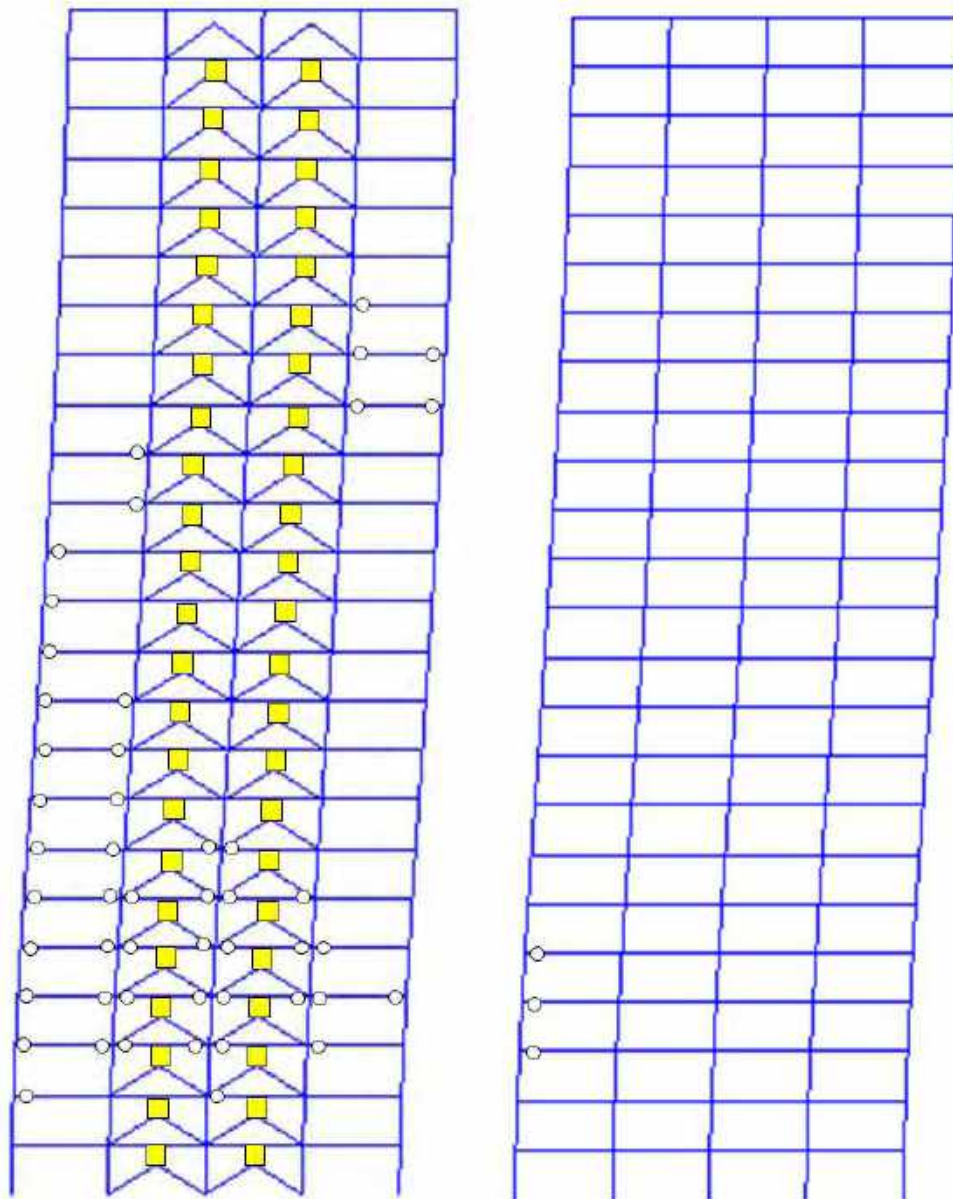
Figura H.70. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración ALAM85-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

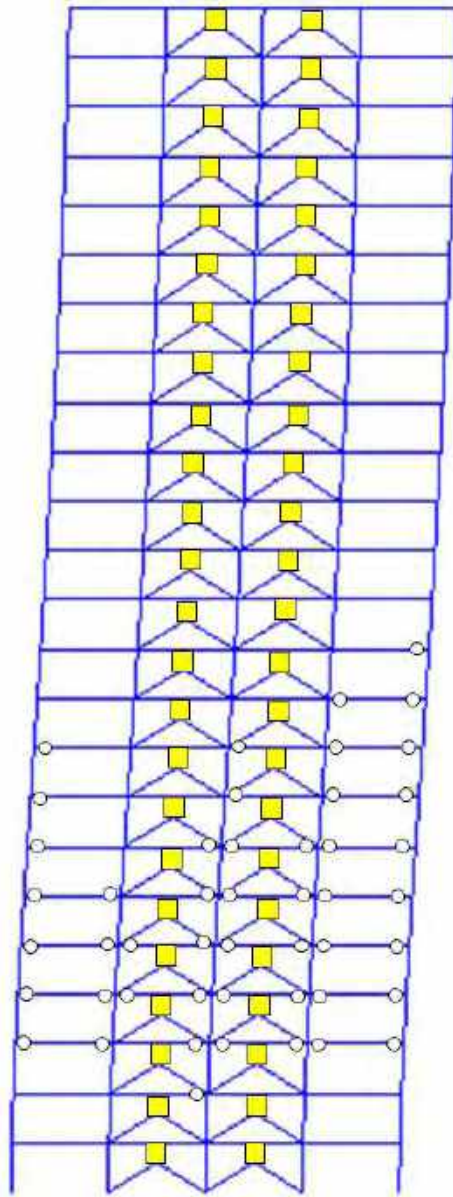
Figura H.71. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TBOM-A (1985)



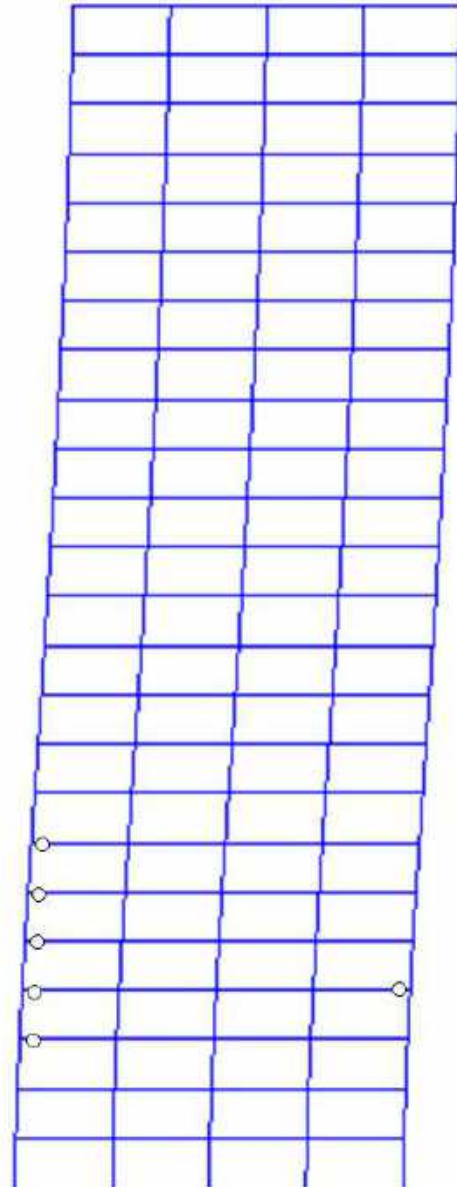
a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura H.72. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TBOM –B (1985)

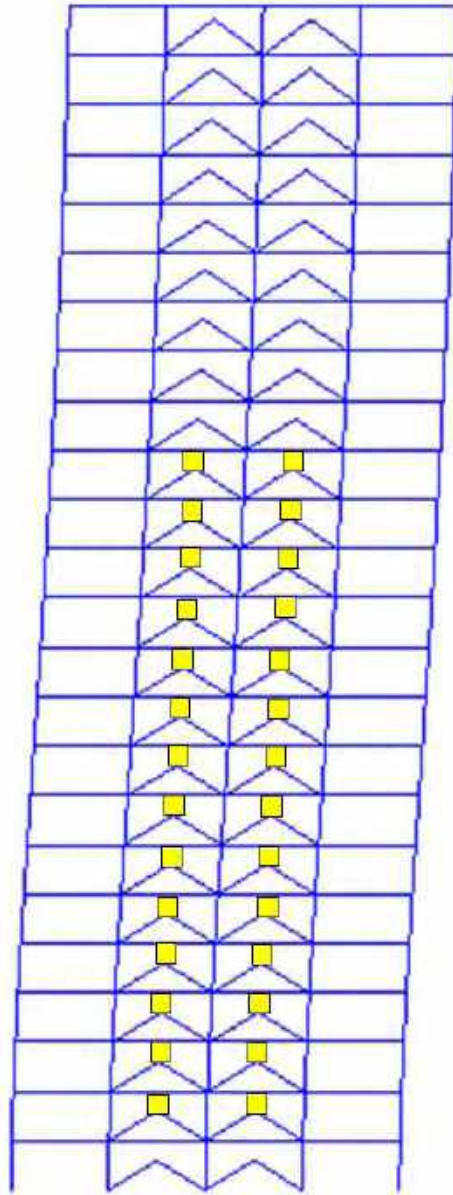


a) Marco perimetral

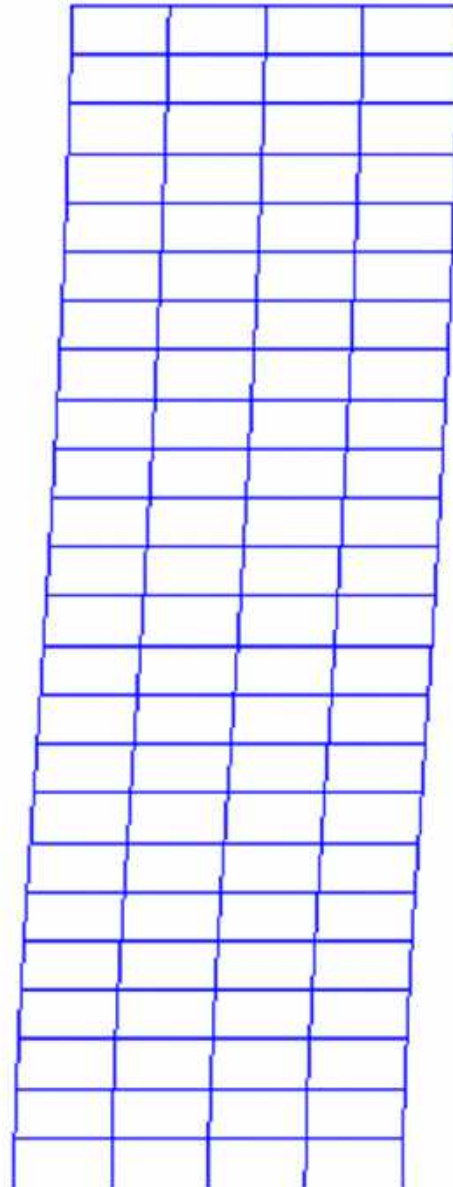


b) Marco interior

Figura H.73. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SCT185-A (1985)

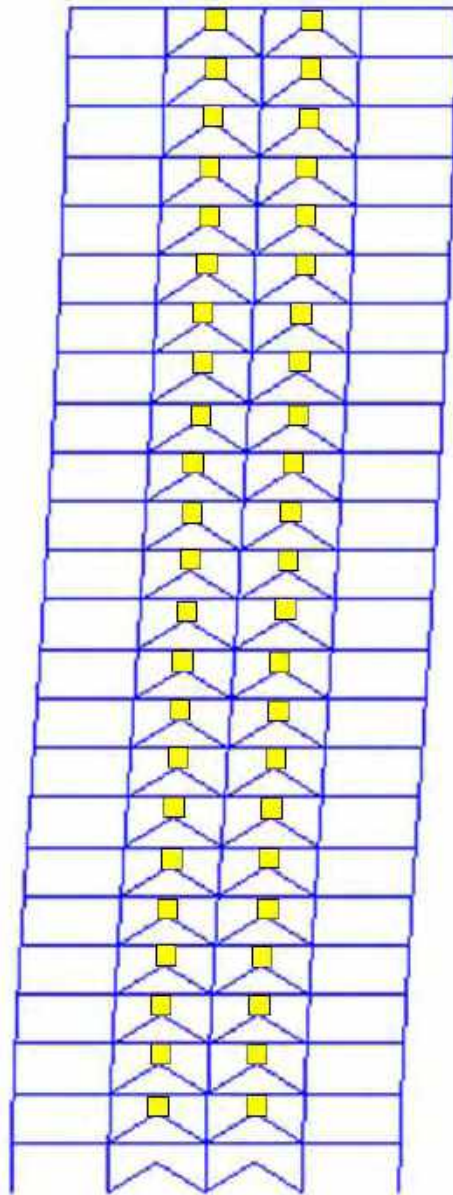


a) Marco perimetral

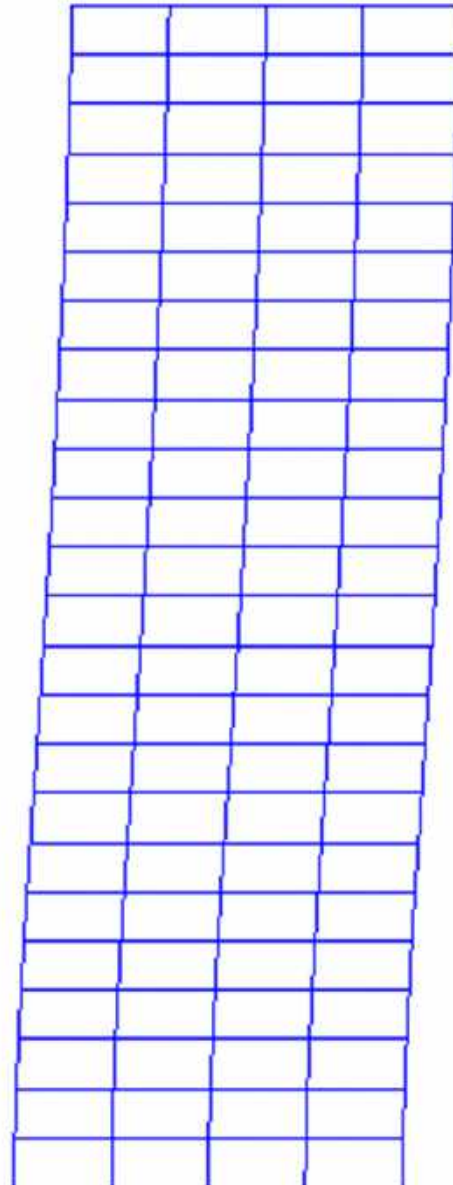


b) Marco interior

Figura H.74. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SCT185-B (1985)

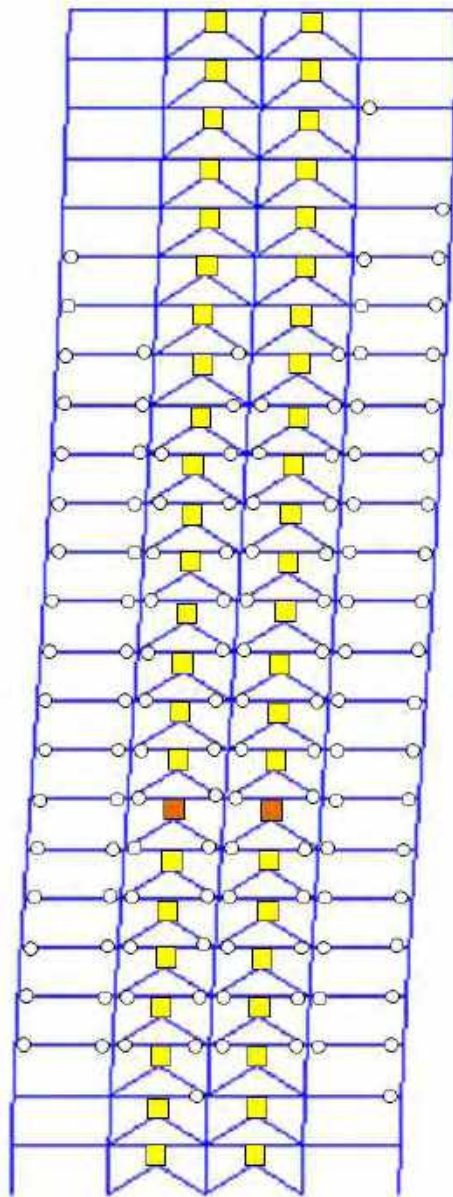


a) Marco perimetral

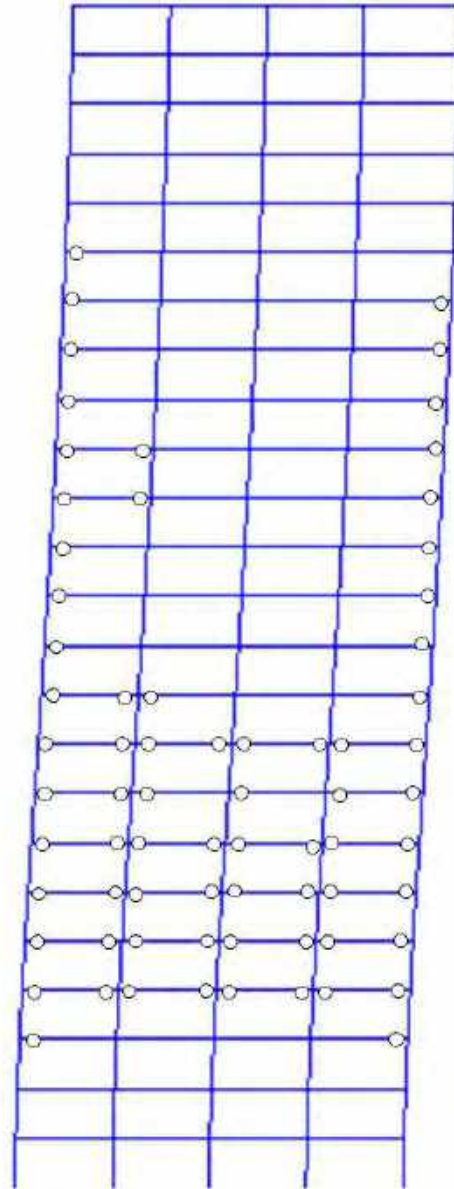


b) Marco interior

Figura H.75. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CH84-A (2017)

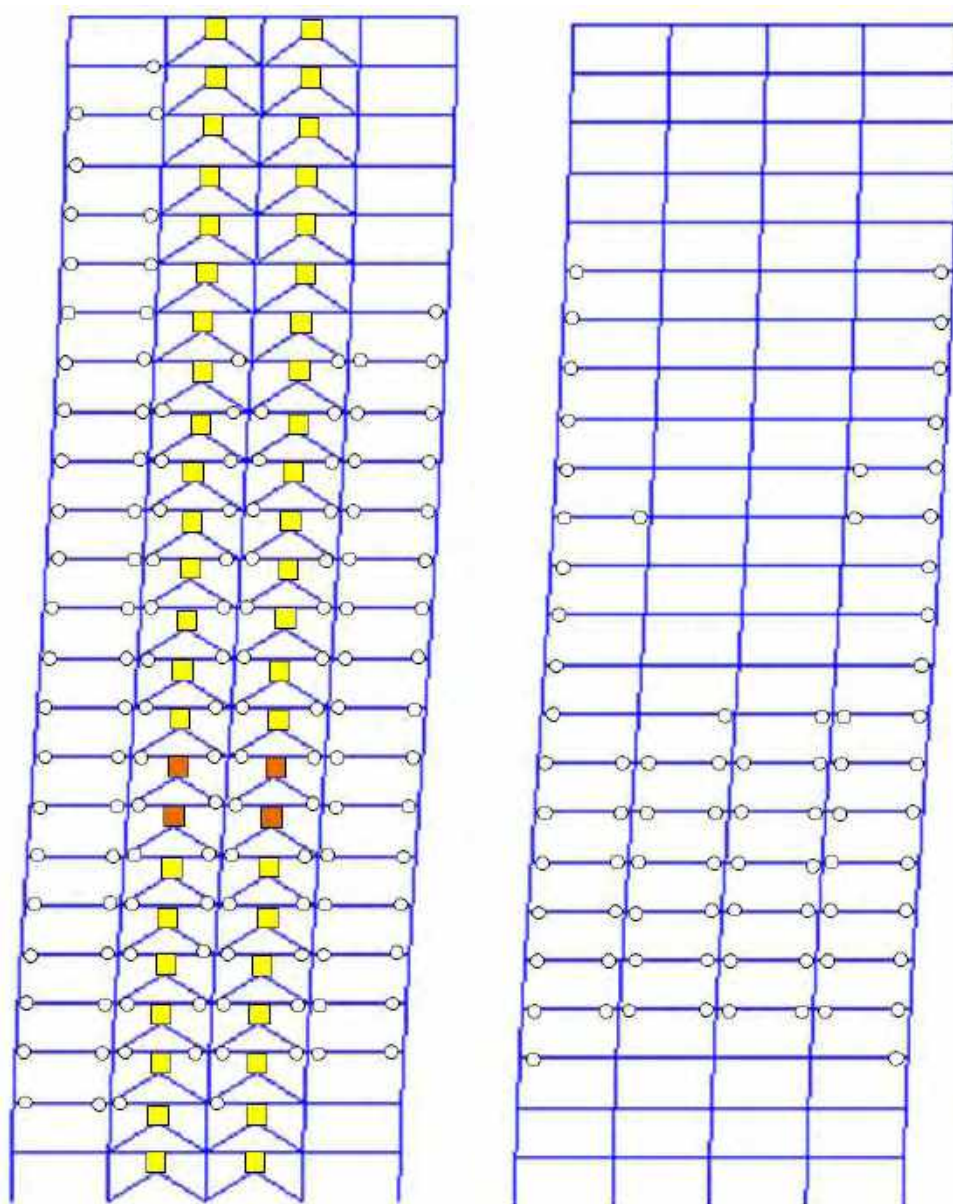


a) Marco perimetral



b) Marco interior

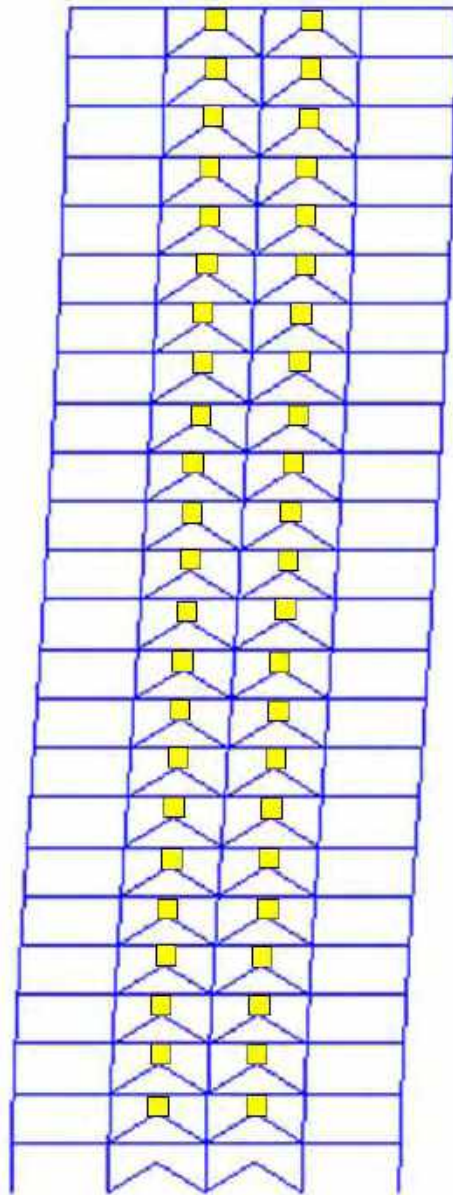
Figura H.76. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CH84-B (2017)



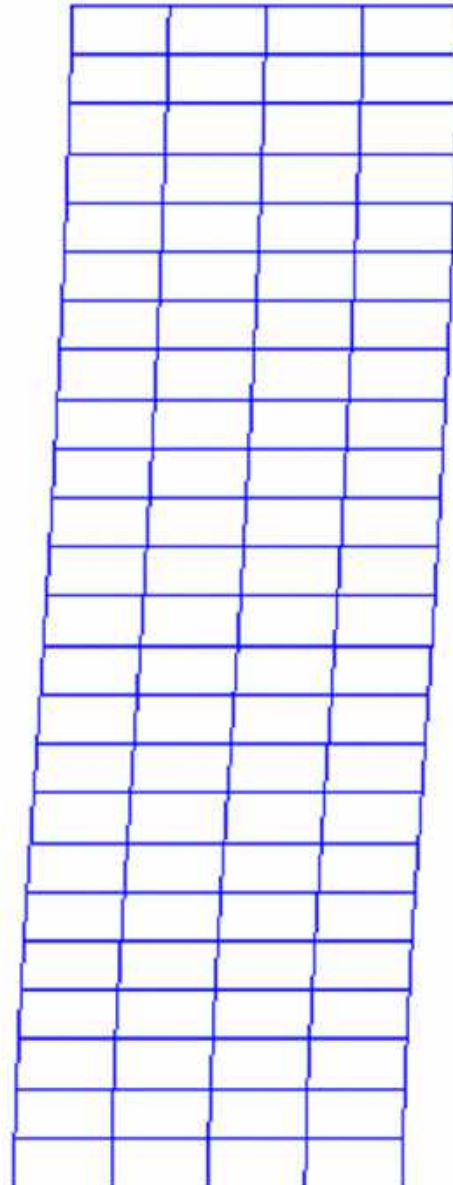
a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura H.77. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-A (2017)

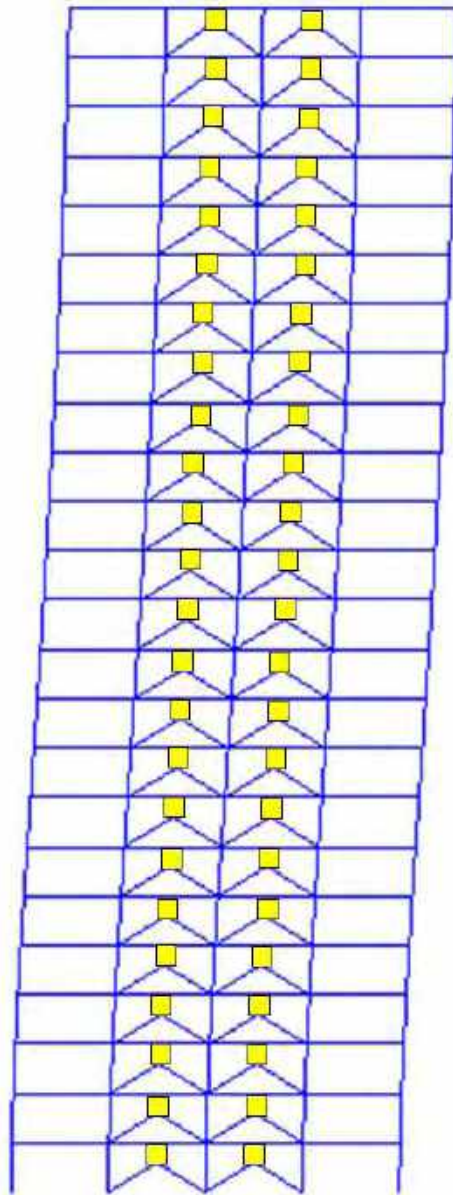


a) Marco perimetral

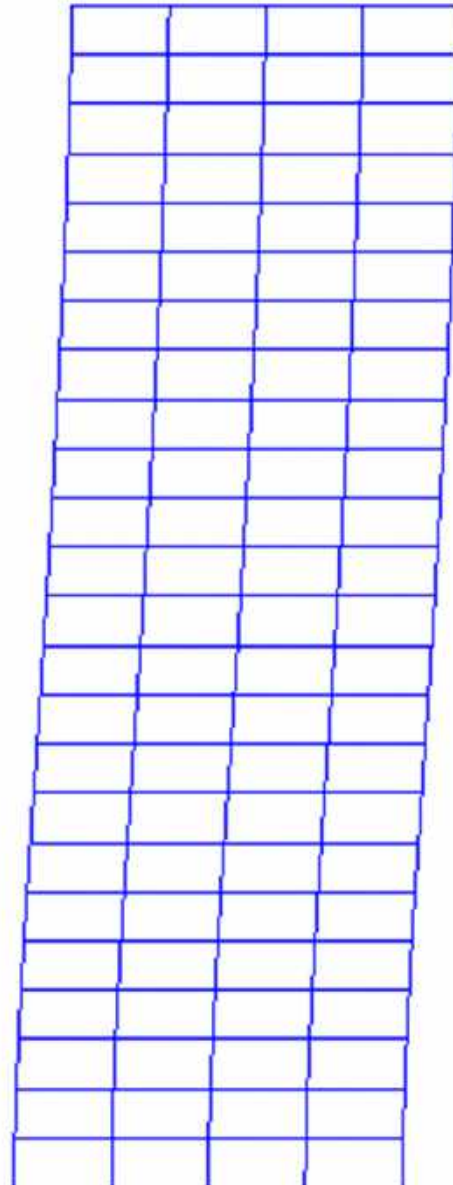


b) Marco interior

Figura H.78. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-B (2017)

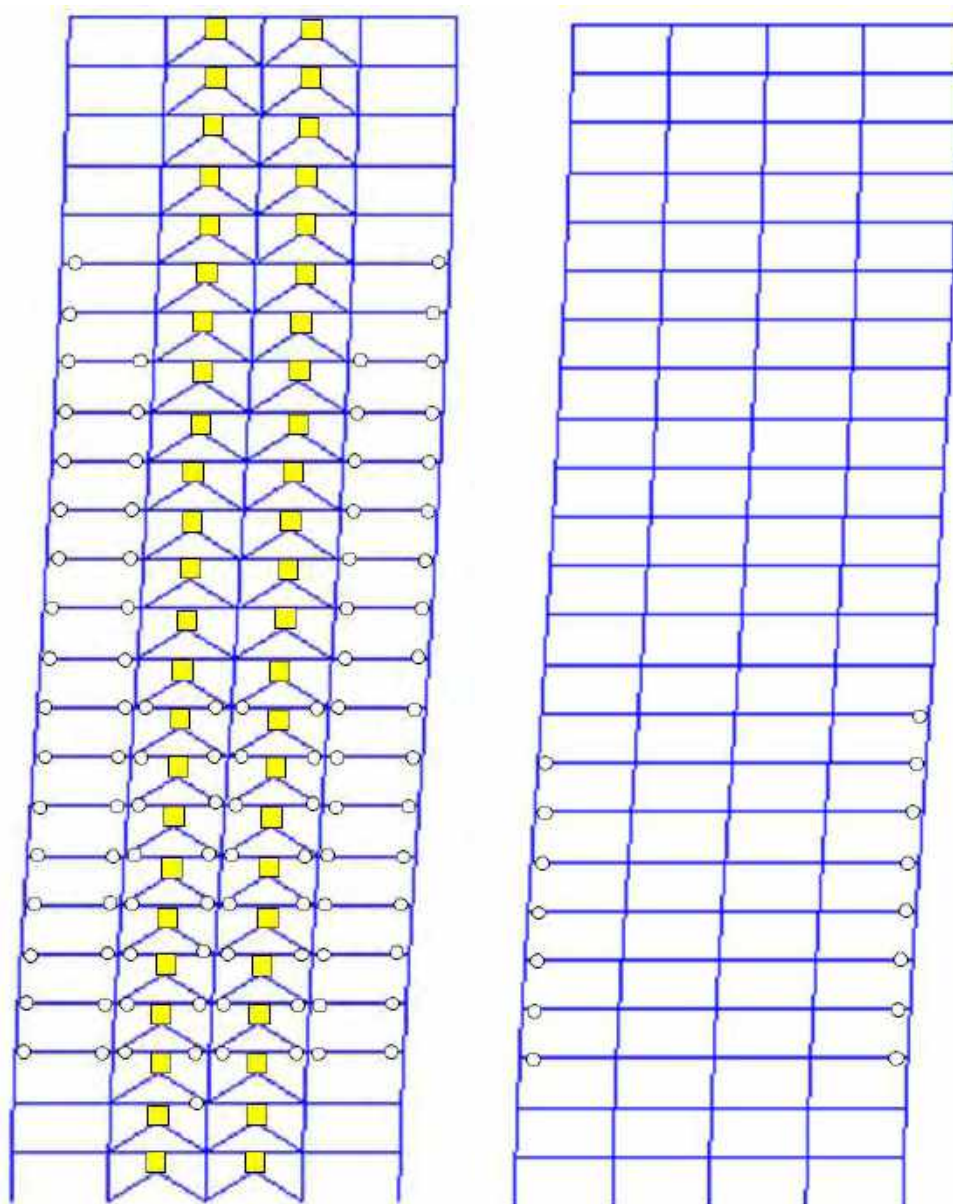


a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura H.79. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración XO36-A (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura H.80. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.1.6 Mapeos de fluencia en dirección y

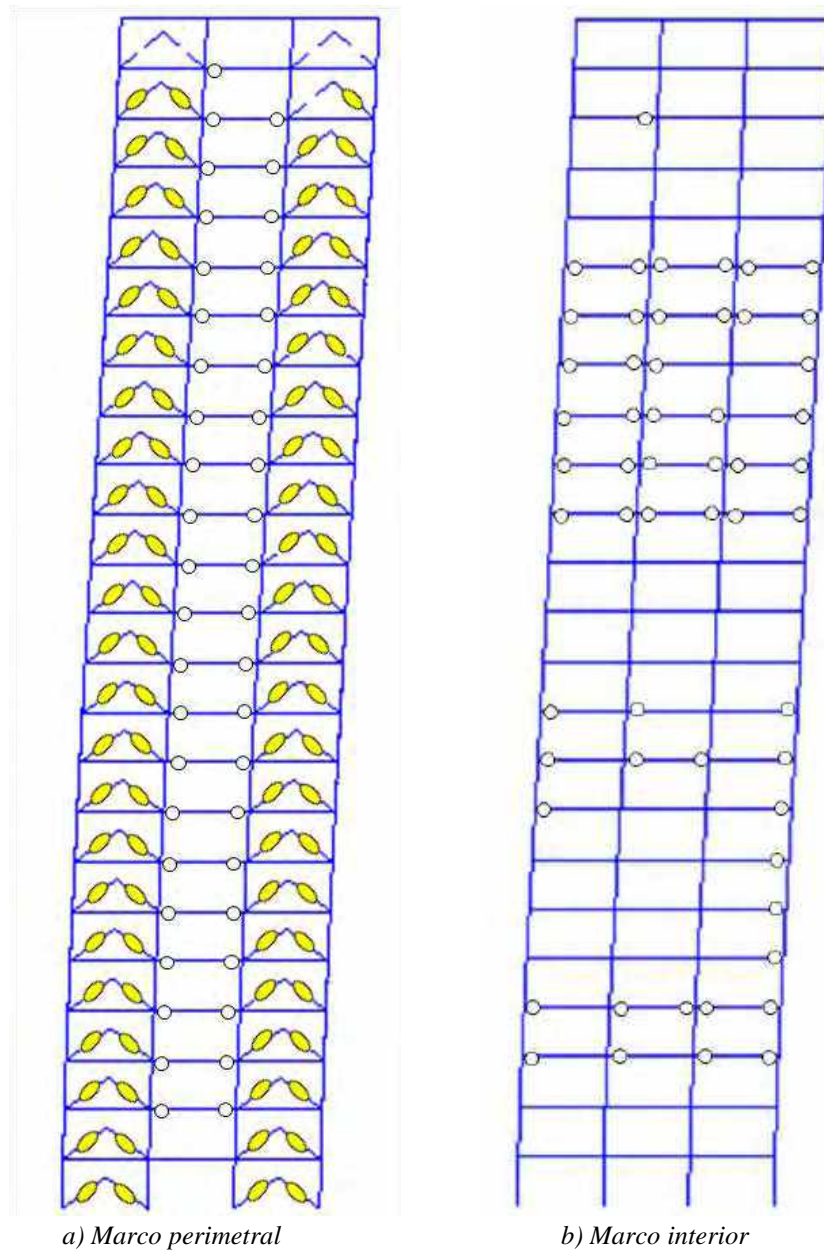
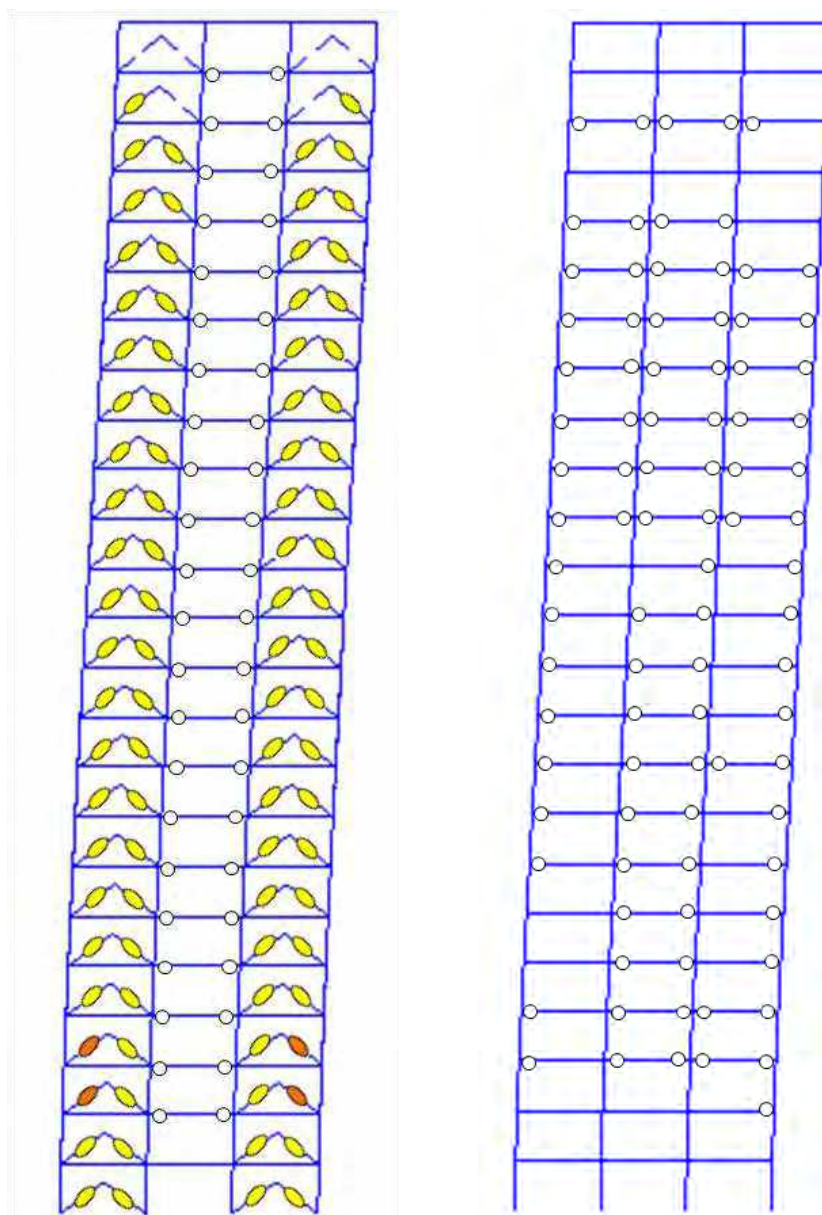
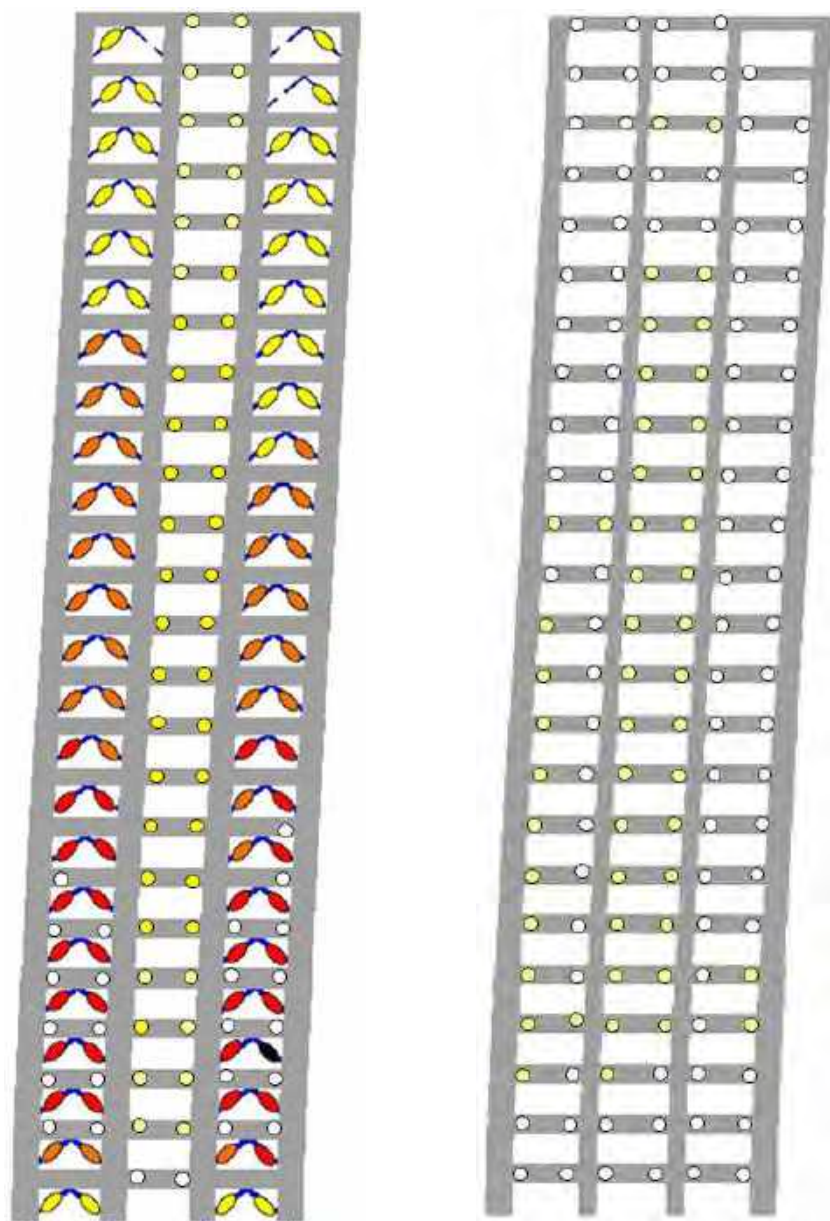


Figura H.81. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TL08-A



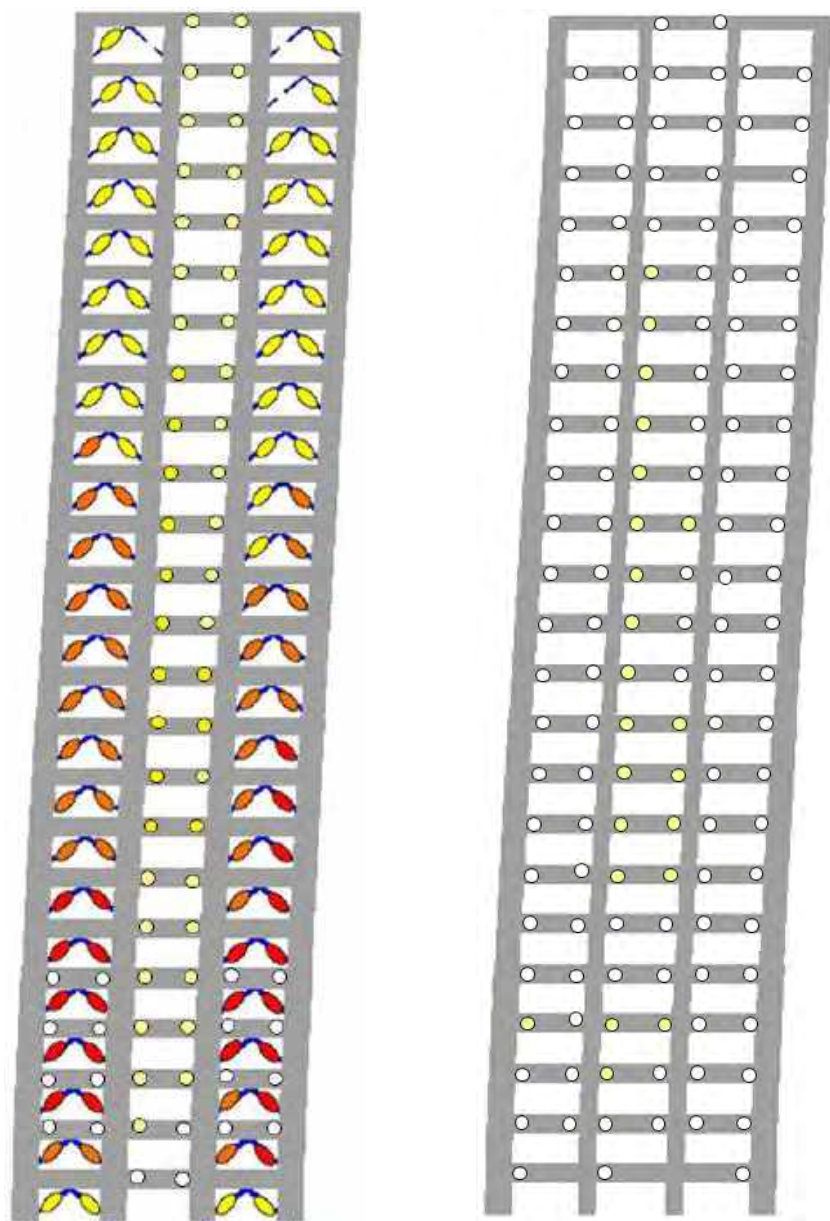
a) Marco perimetral
b) Marco interior
Figura H.82. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TL08-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

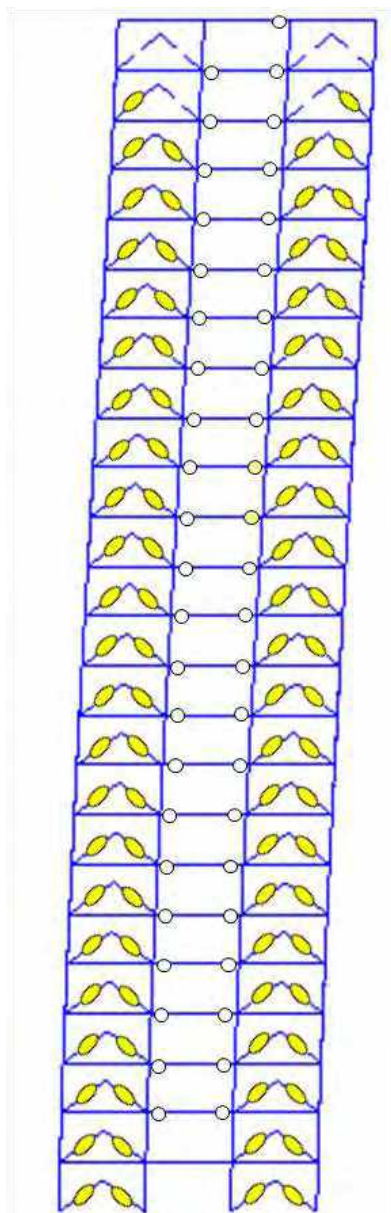
Figura H.83. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CJ03-A



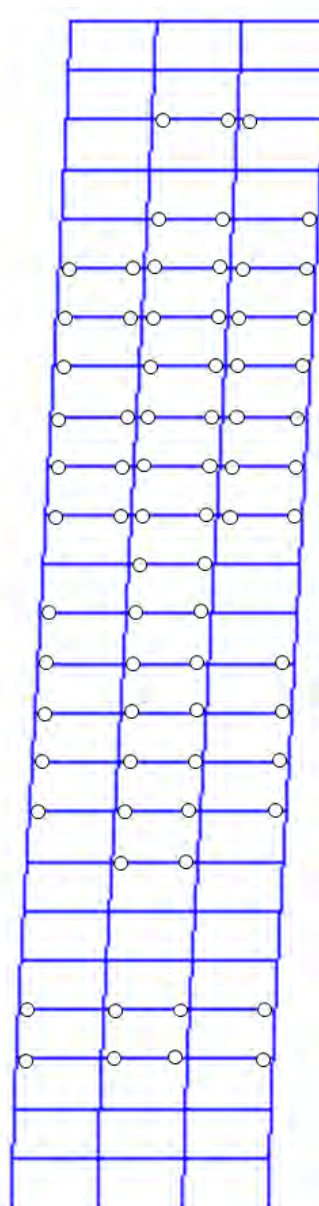
a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura H.84. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CJ03-B

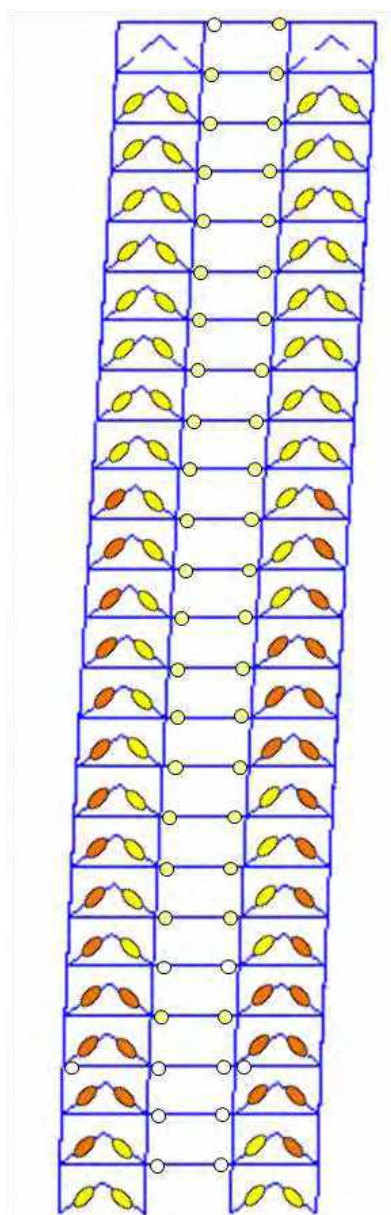


a) Marco perimetral

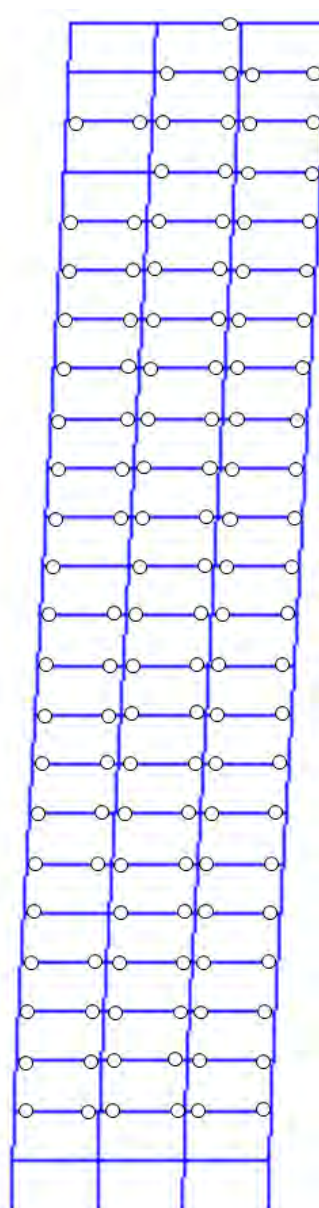


b) Marco interior

Figura H.85. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración ALAM85-A

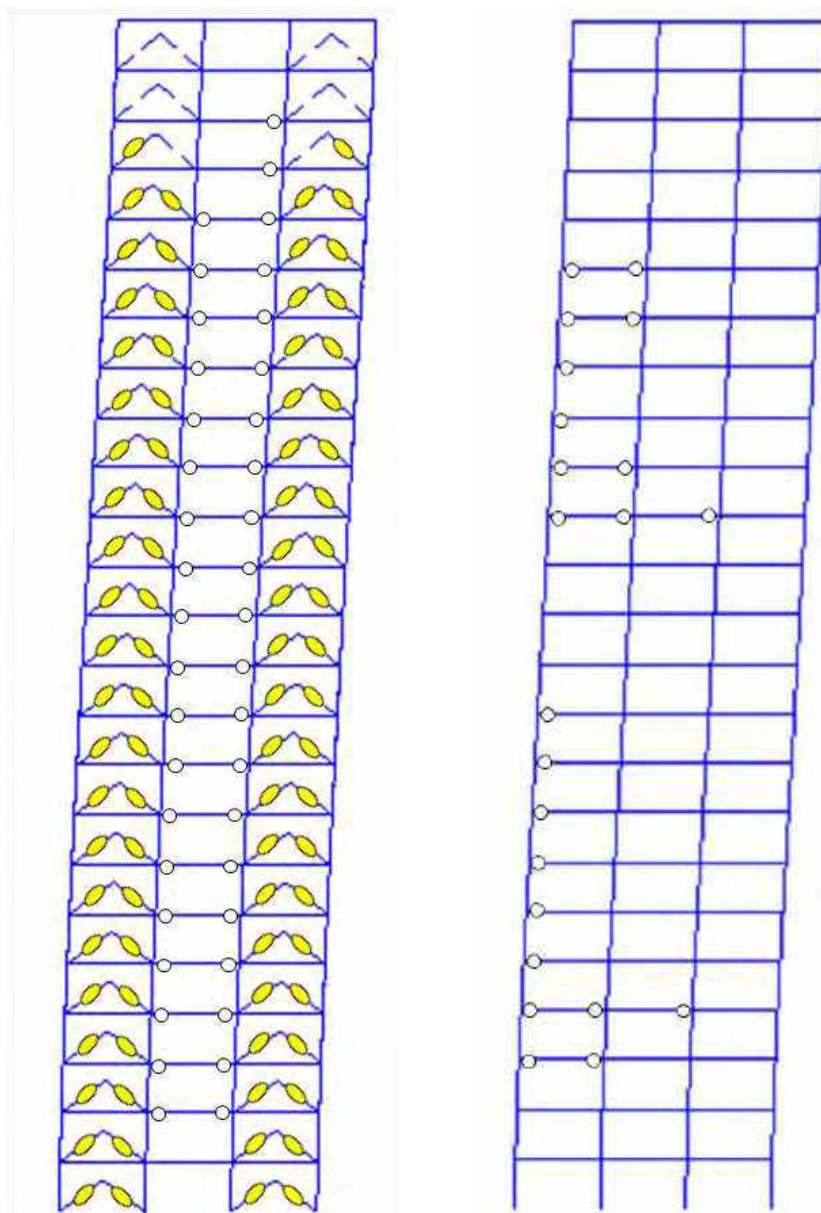


a) Marco perimetral



b) Marco interior

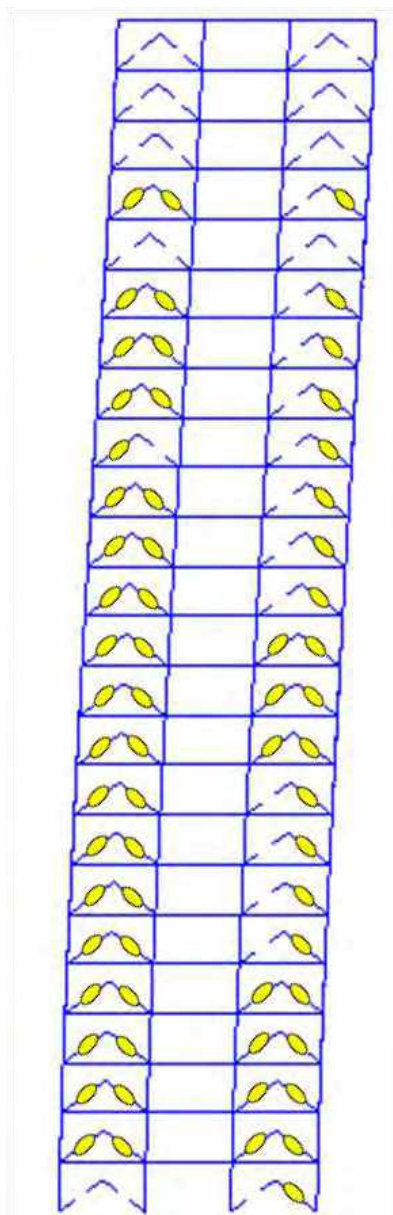
Figura H.86. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración ALAM85-B



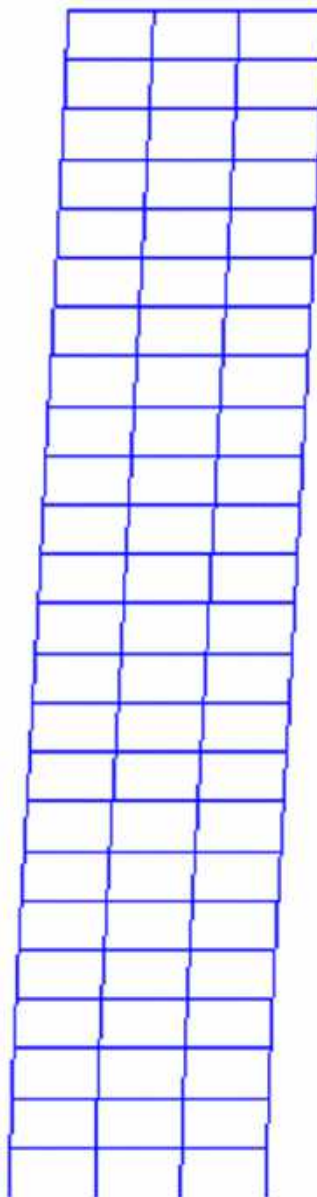
a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura H.87. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TBOM-A (1985)

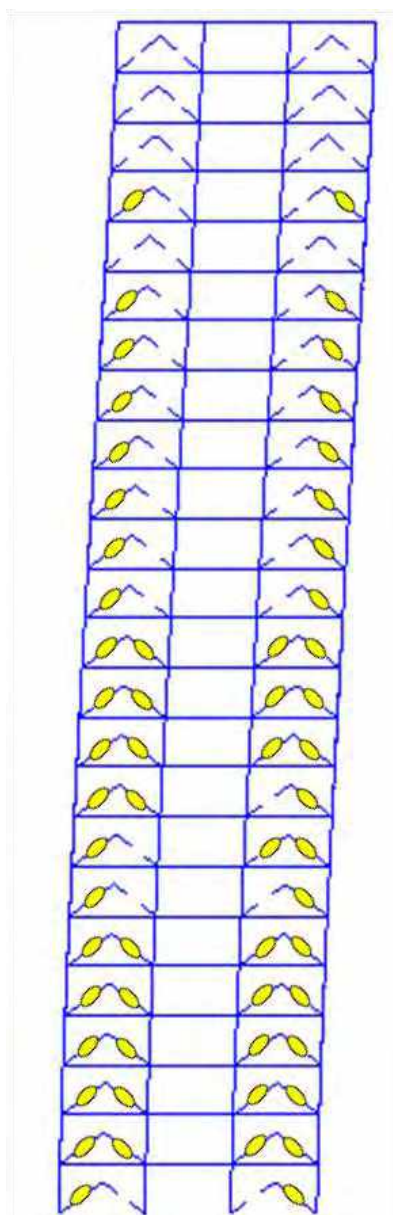


a) Marco perimetral

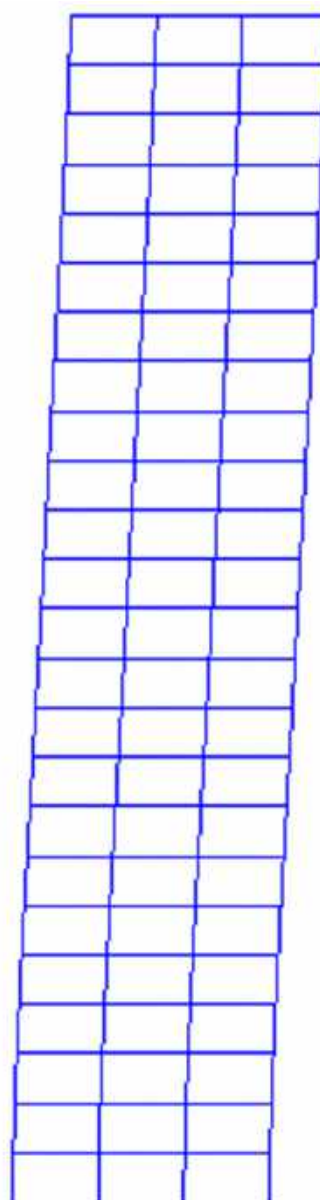


b) Marco interior

Figura H.88. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TBOM –B (1985)

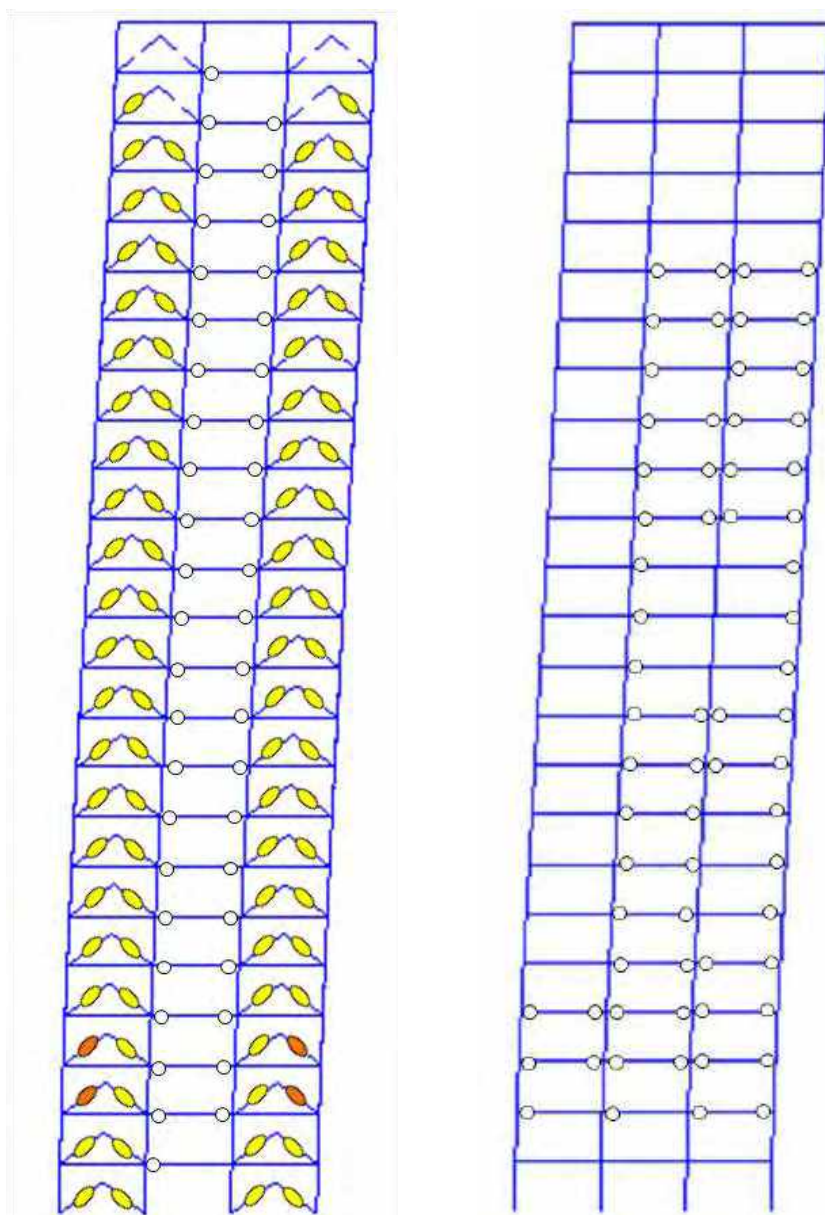


a) Marco perimetral



b) Marco interior

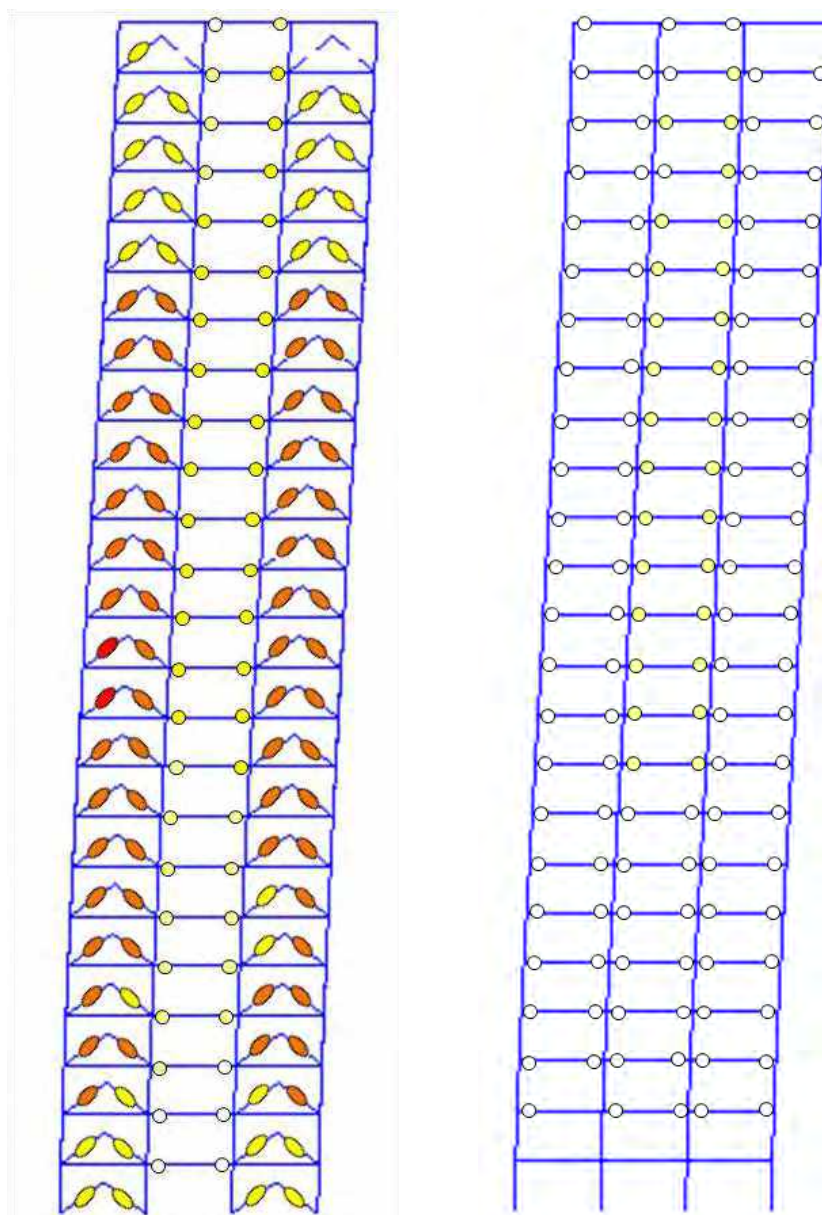
Figura H.89. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SCT185-A (1985)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

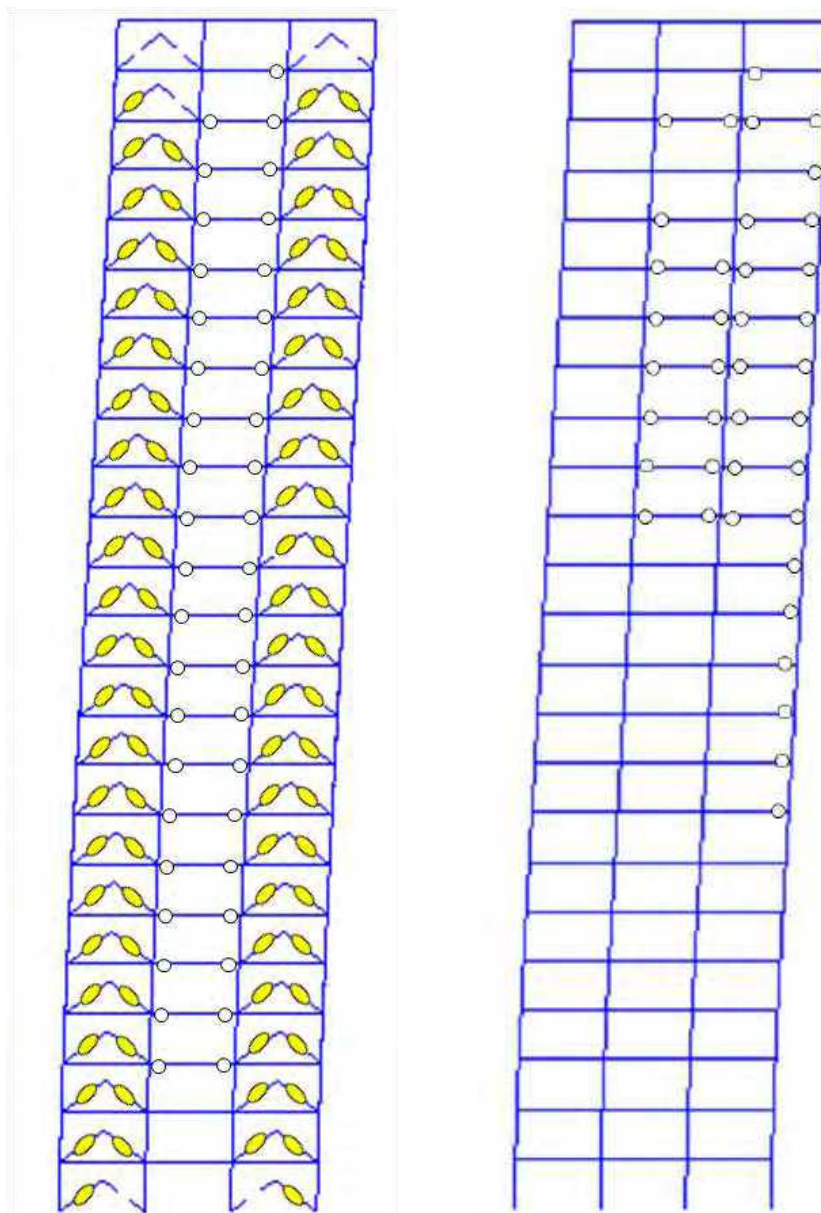
Figura H.90. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SCT185-B (1985)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

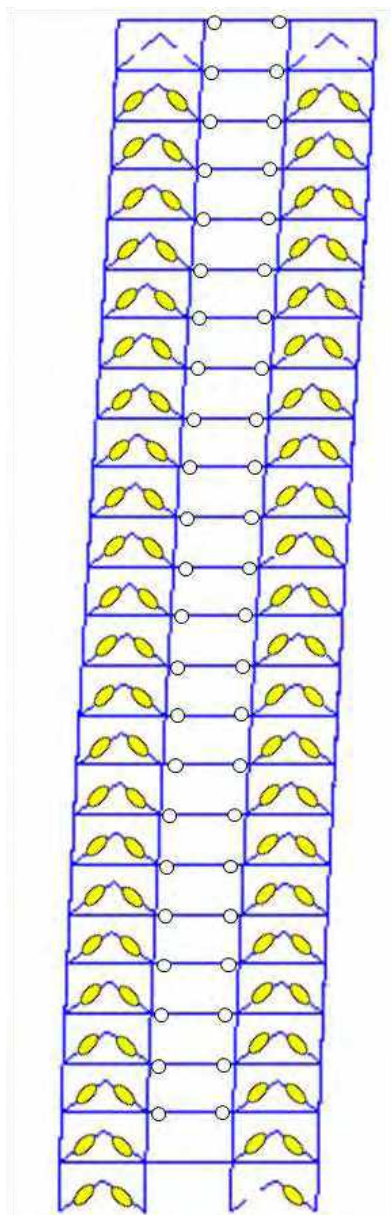
Figura H.91. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CH84-A (2017)



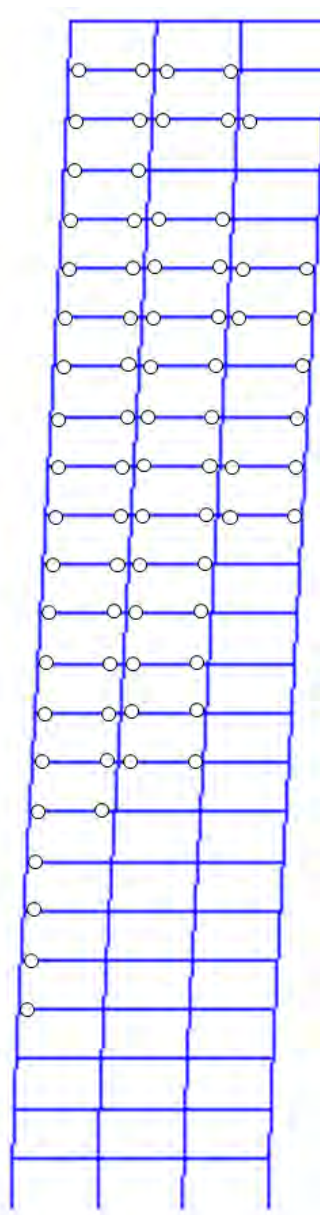
a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura H.92. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CH84-B (2017)

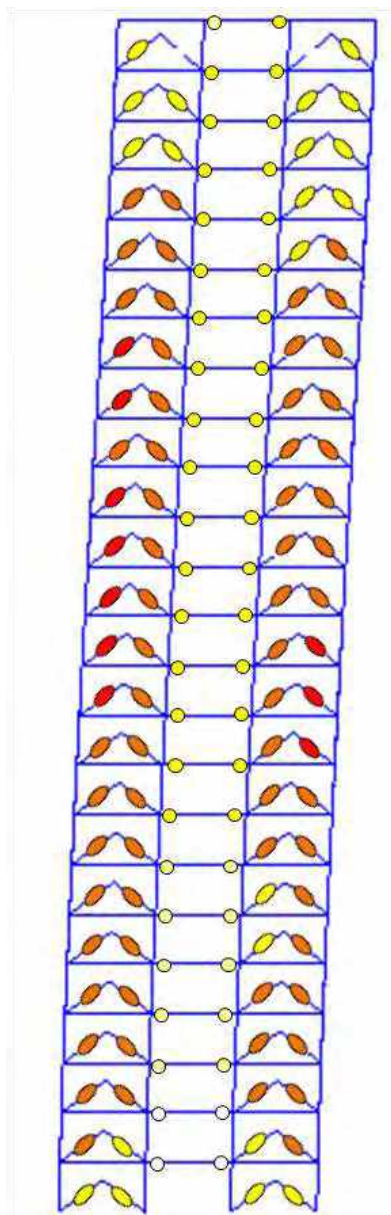


a) Marco perimetral

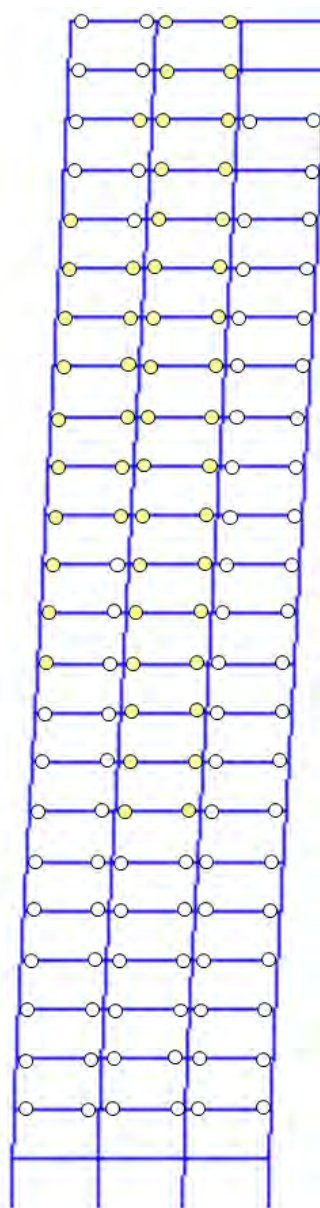


b) Marco interior

Figura H.93. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-A (2017)

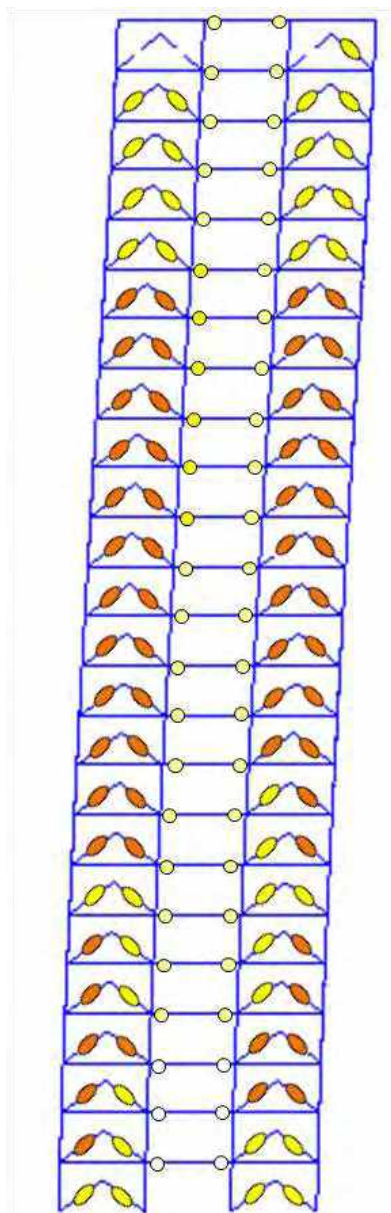


a) Marco perimetral

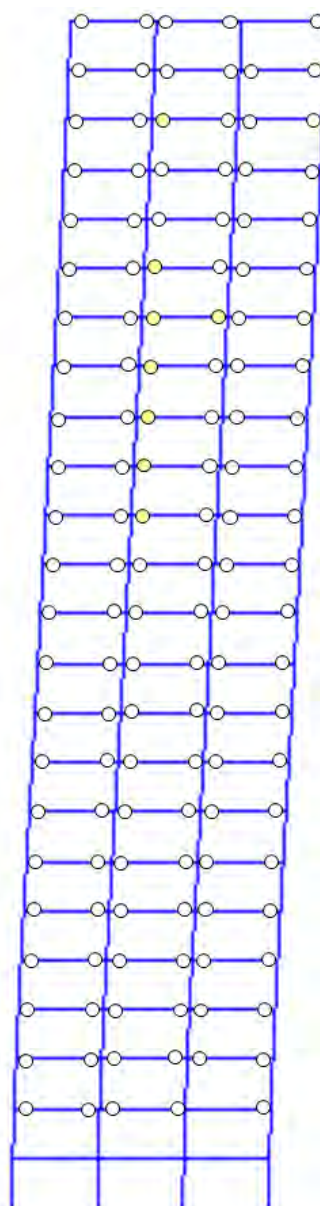


b) Marco interior

Figura H.94. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-B (2017)

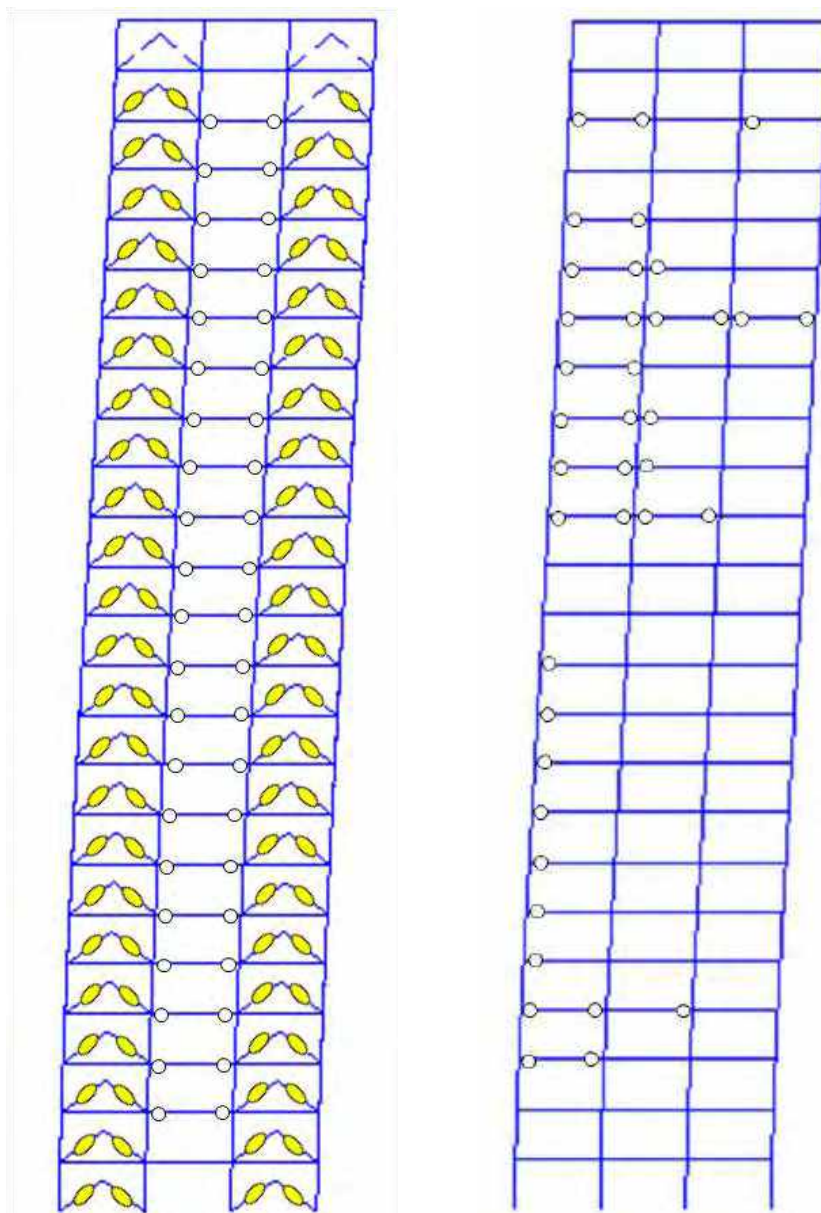


a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura H.95. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración XO36-A (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura H.96. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.1.7 Respuesta Global

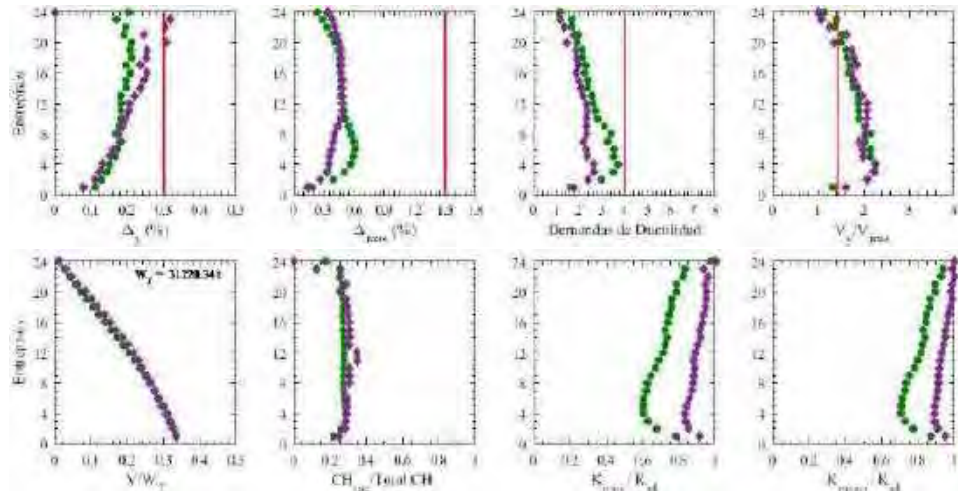


Figura H.97. Resumen de respuesta global, registros de aceleración TL08-A

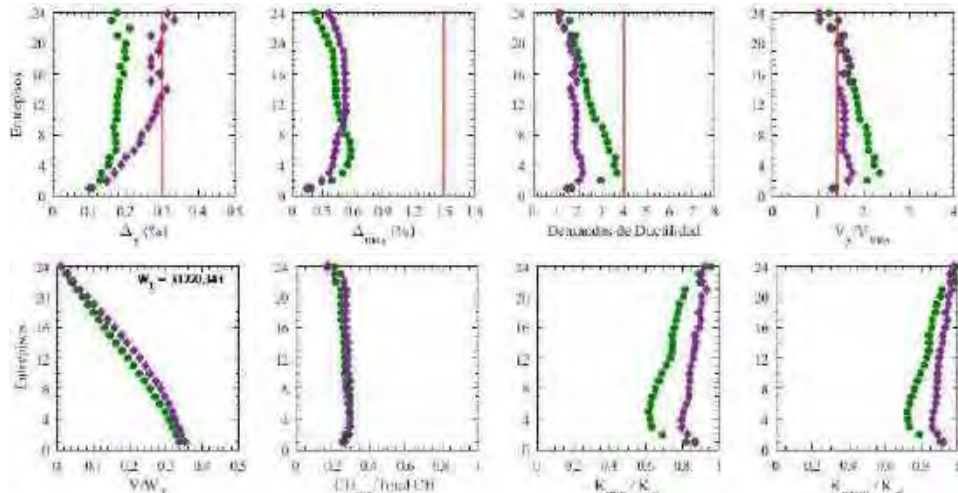


Figura H.98. Resumen de respuesta global, registros de aceleración TL08-B

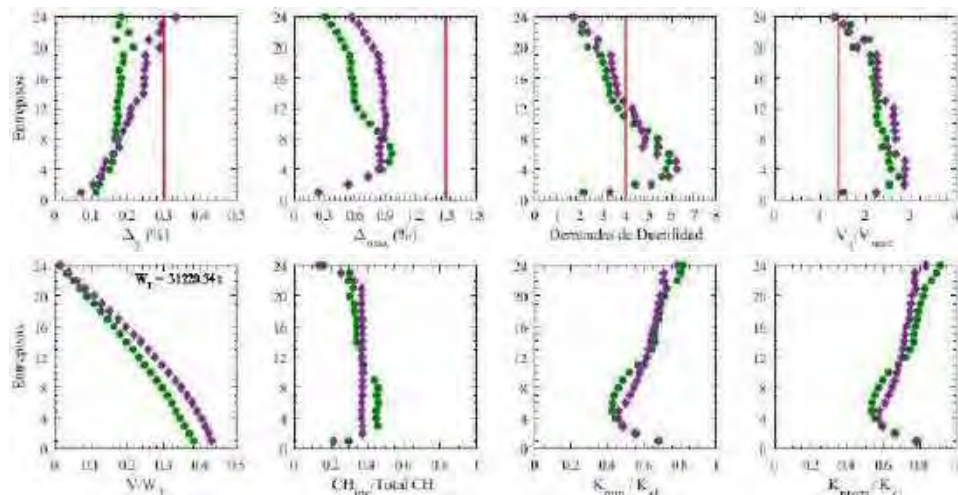


Figura H.99. Resumen de respuesta global, registros de aceleración CJ03-A

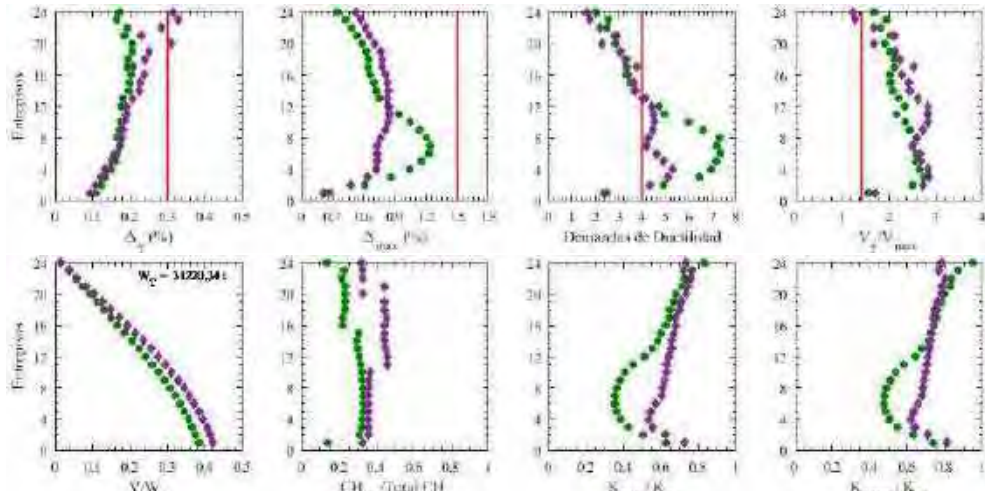


Figura H.100. Resumen de respuesta global, registros de aceleración CJ03-B

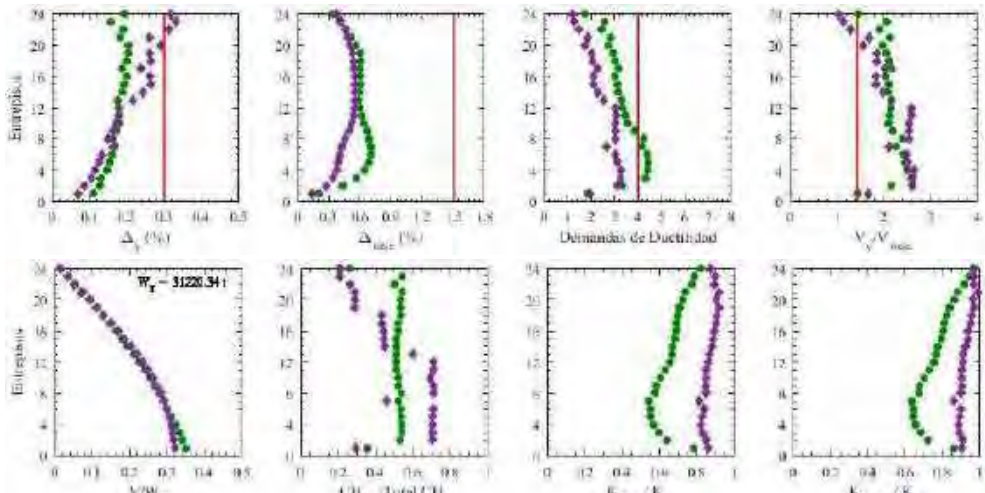


Figura H.101. Resumen de respuesta global, registros de aceleración ALAM85-A

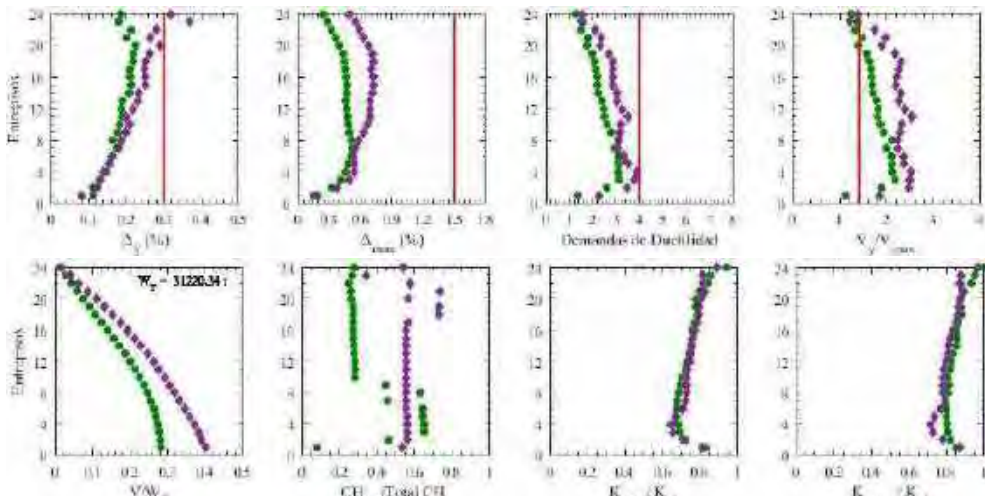


Figura H.102. Resumen de respuesta global, registros de aceleración ALAM85-B

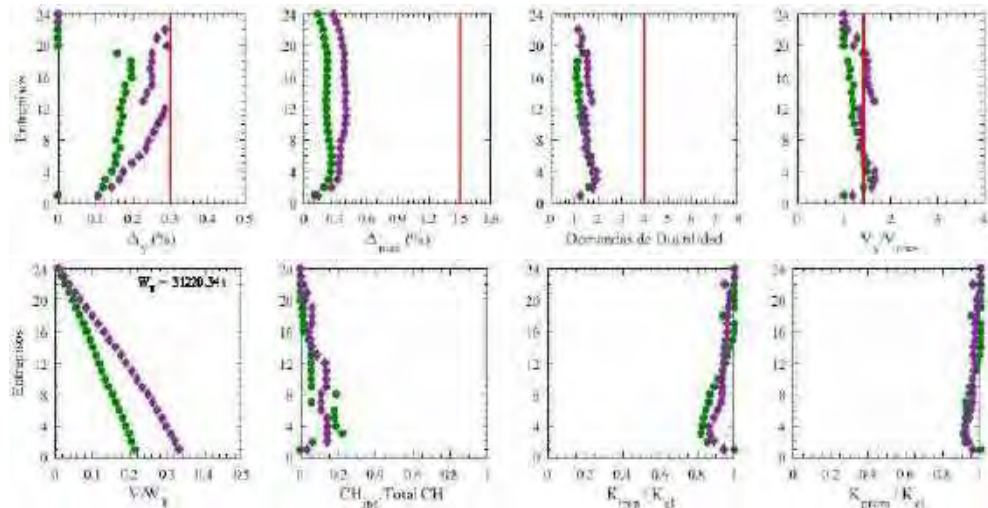


Figura H.103. Resumen de respuesta global, registros de aceleración TBOM-A (1985)

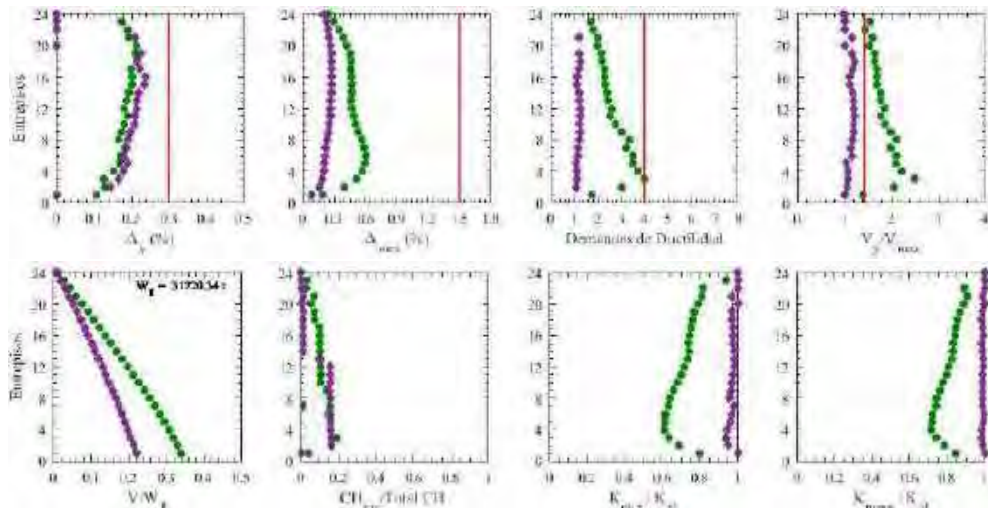


Figura H.104. Resumen de respuesta global, registros de aceleración TBOM-B (1985)

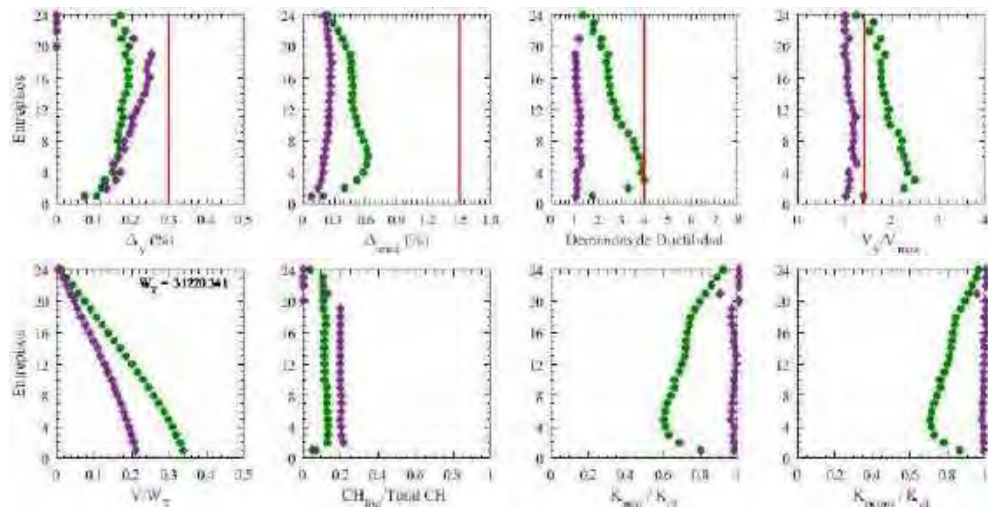


Figura H.105. Resumen de respuesta global, registros de aceleración SCT185-A (1985)

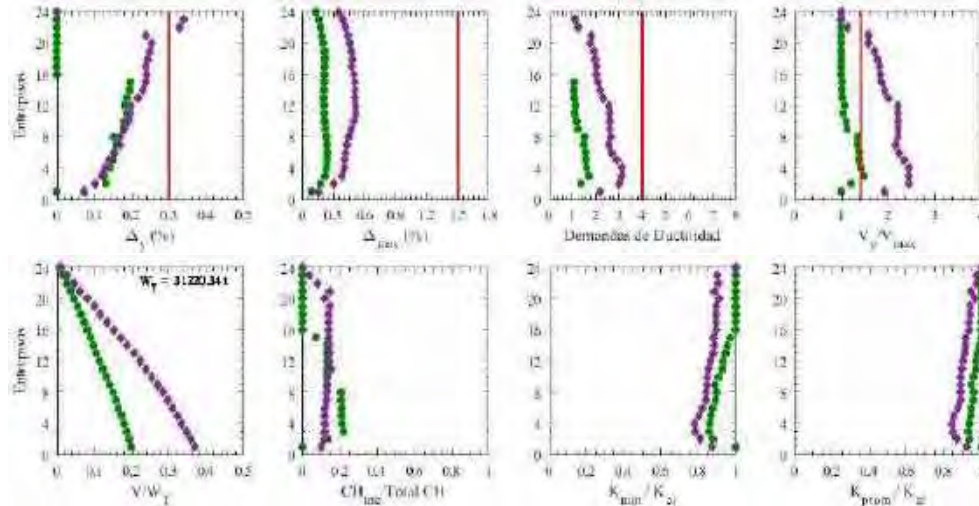


Figura H.106. Resumen de respuesta global, registros de aceleración SCT185-B (1985)

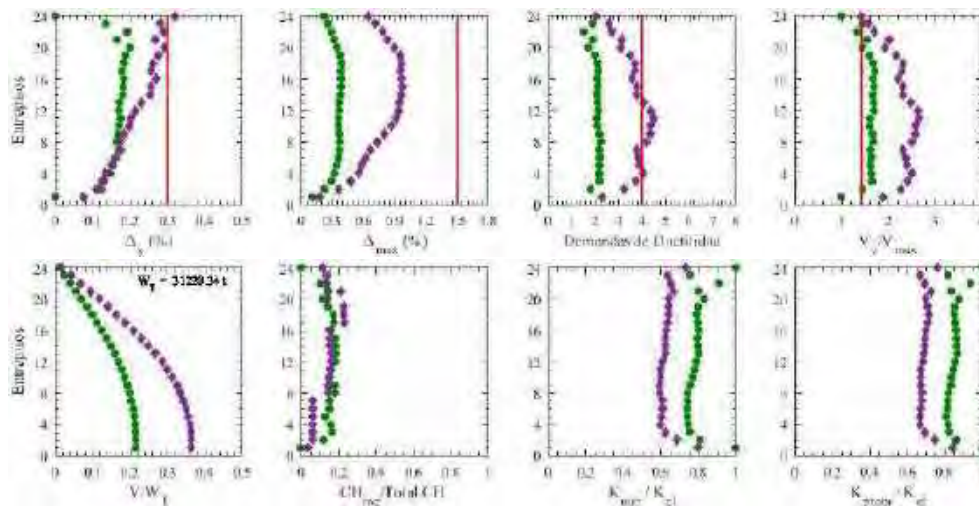


Figura H.107. Resumen de respuesta global, registros de aceleración CH84-A (2017)

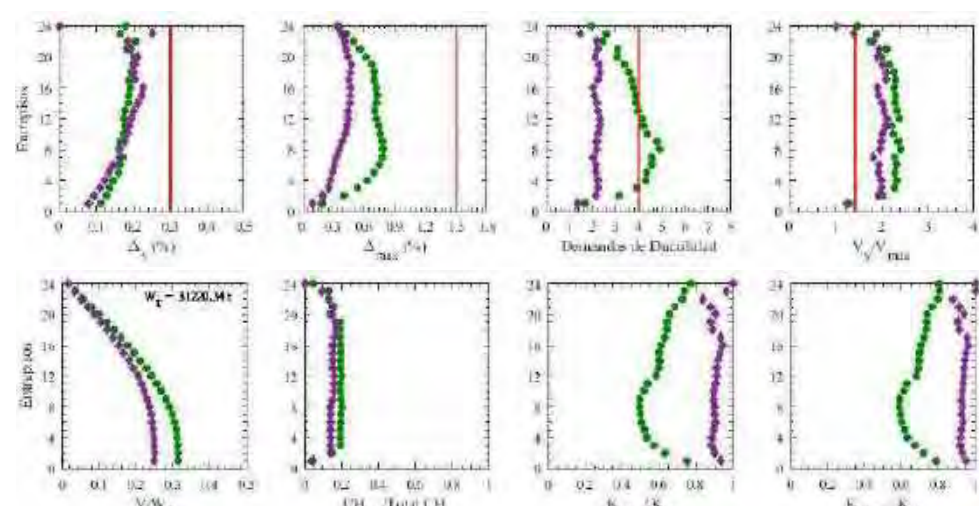


Figura H.108. Resumen de respuesta global, registros de aceleración CH84-B (2017)

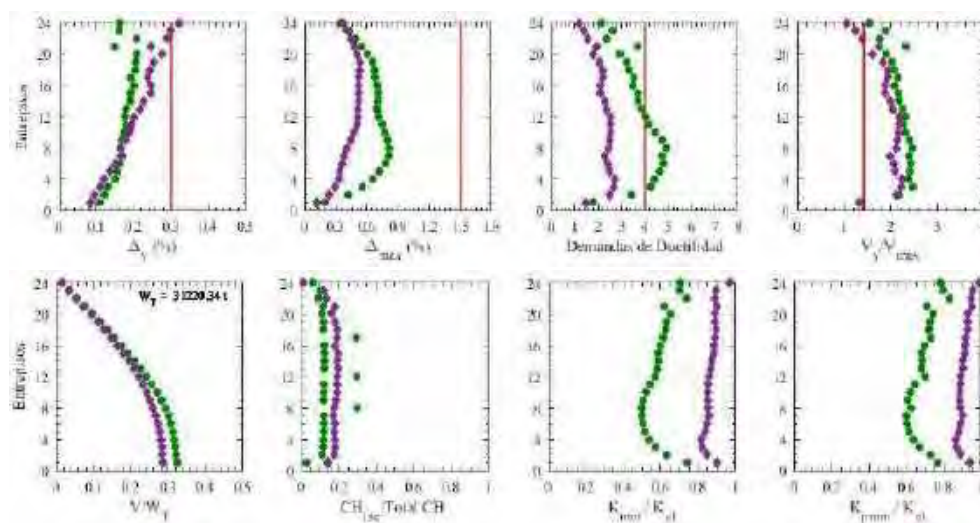


Figura H.109. Resumen de respuesta global, registros de aceleración MI15-A (2017)

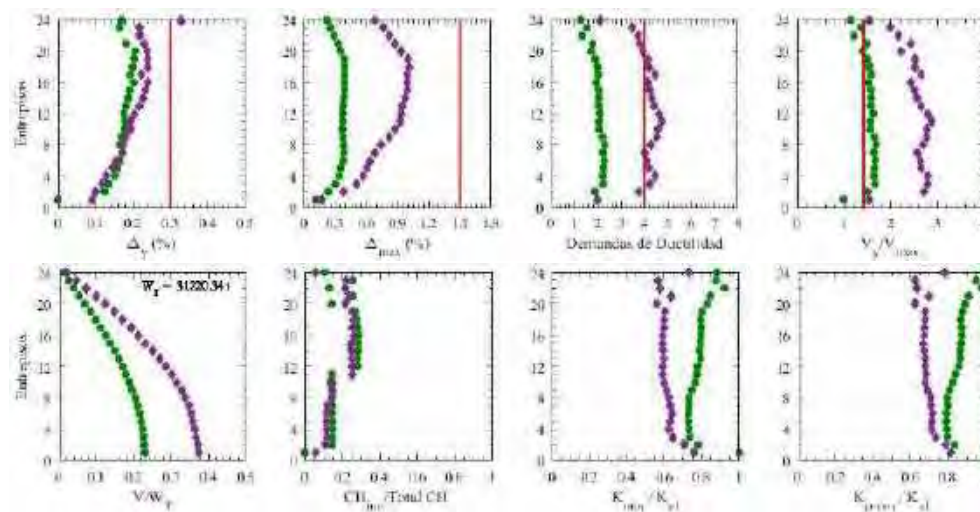


Figura H.110. Resumen de respuesta global, registros de aceleración MI15-B (2017)

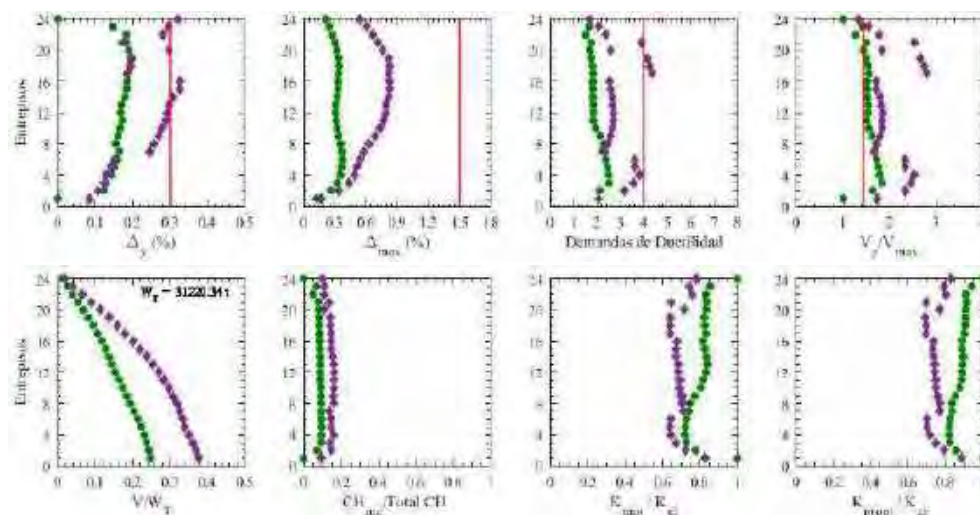


Figura H.111. Resumen de respuesta global, registros de aceleración XO36-A (2017)

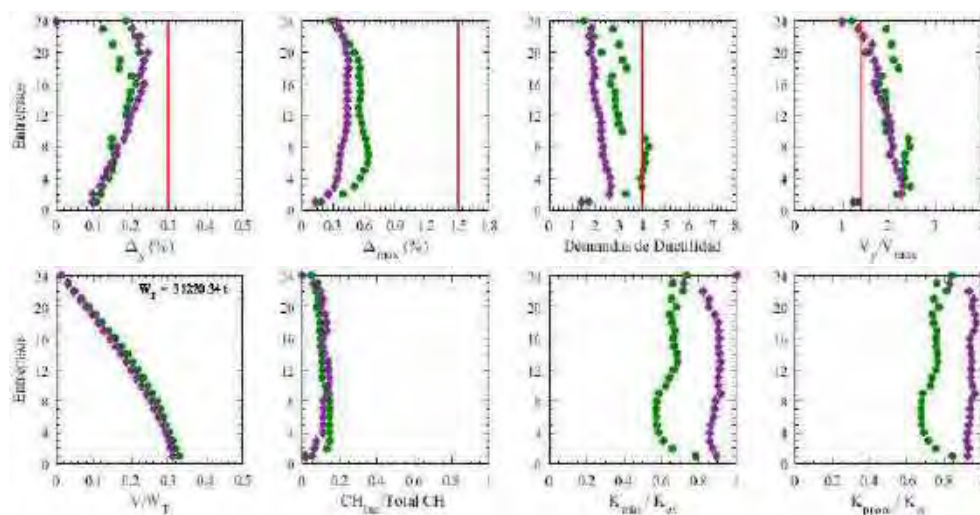


Figura H.112. Resumen de respuesta global, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.1.8 Distorsiones Residuales

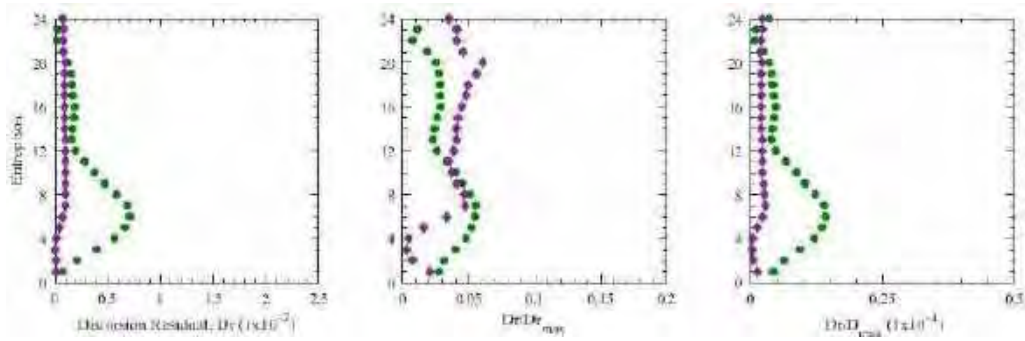


Figura H.113. Distorsiones residuales, registros de aceleración TL08-A

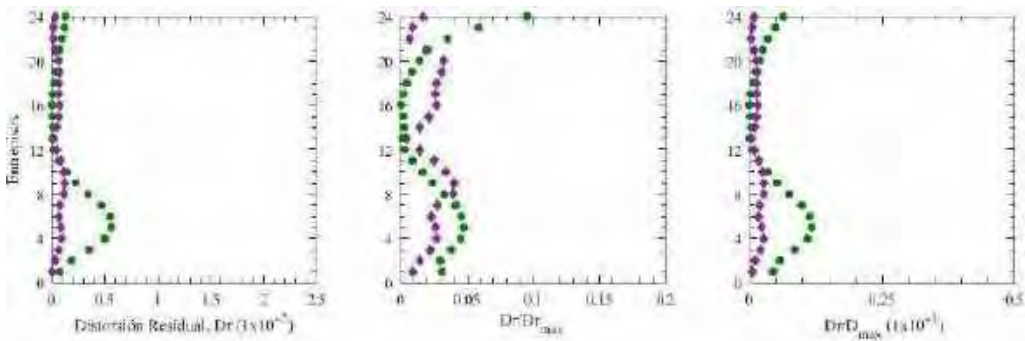


Figura H.114. Distorsiones residuales, registros de aceleración TL08-B

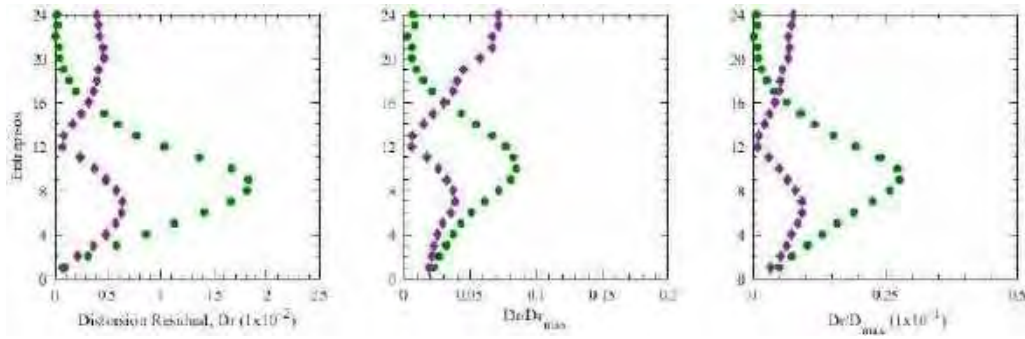


Figura H.115. Distorsiones residuales, registros de aceleración CJ03-A

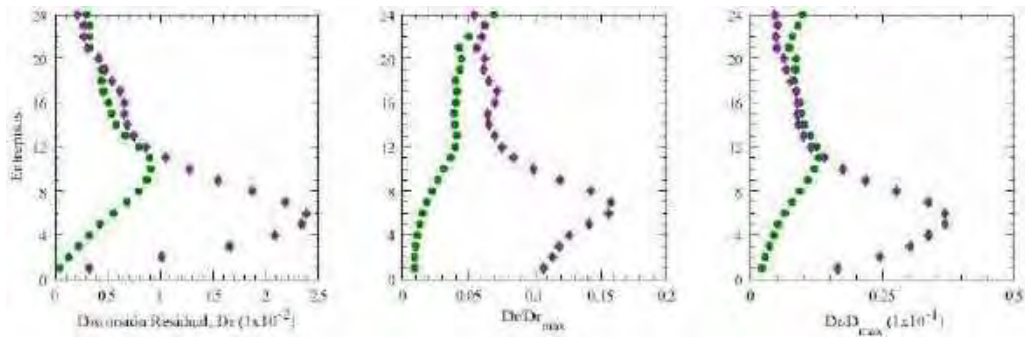


Figura H.116. Distorsiones residuales, registros de aceleración CJ03-B

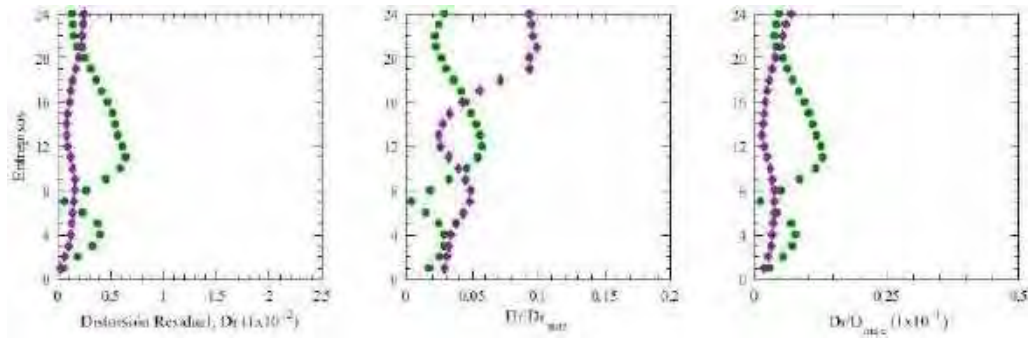


Figura H.117. Distorsiones residuales, registros de aceleración ALAM85-A

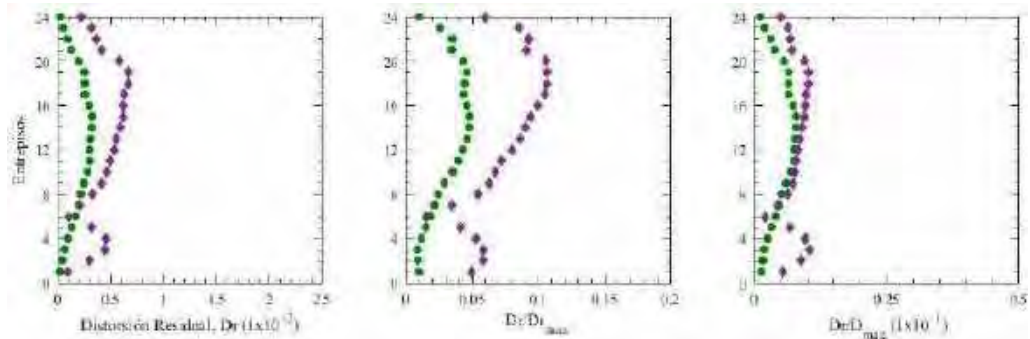


Figura H.118. Distorsiones residuales, registros de aceleración ALAM85-B

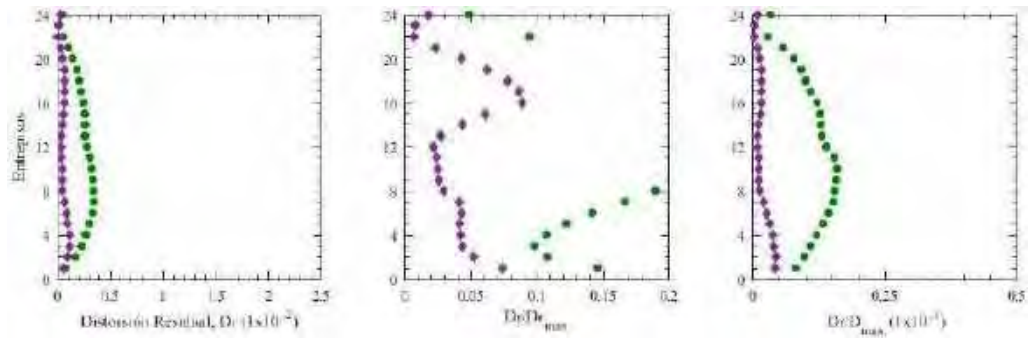


Figura H.119. Distorsiones residuales, registros de aceleración TBOM-A (1985)

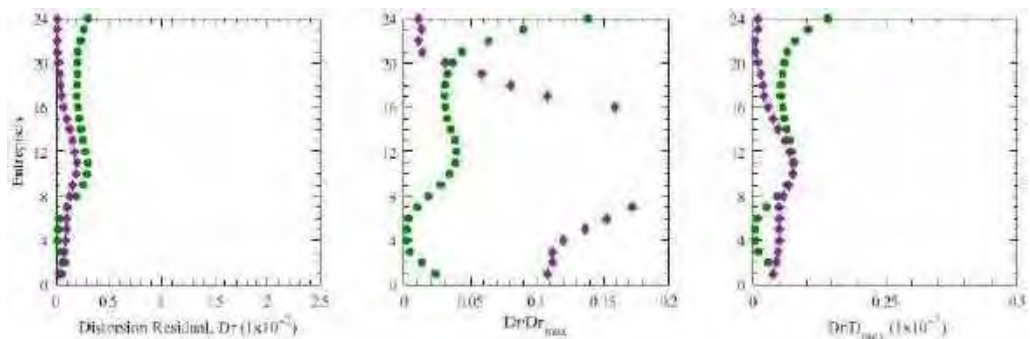


Figura H.120. Distorsiones residuales, registros de aceleración TBOM-B (1985)

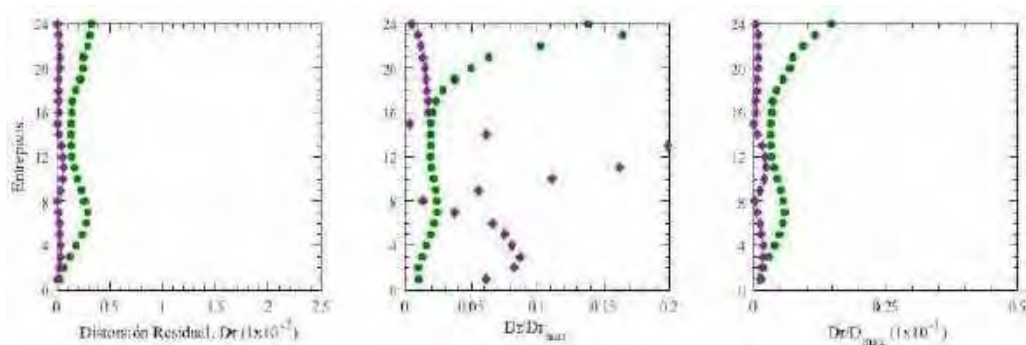


Figura H.121. Distorsiones residuales, registros de aceleración SCT185-A (1985)

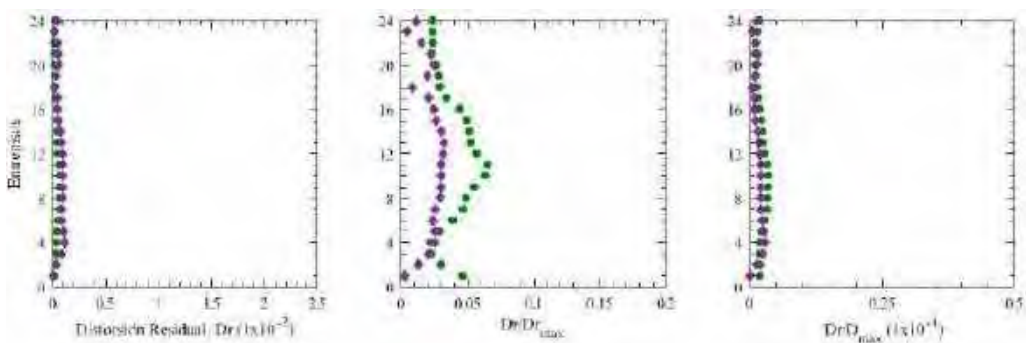


Figura H.122. Distorsiones residuales, registros de aceleración SCT185-B (1985)

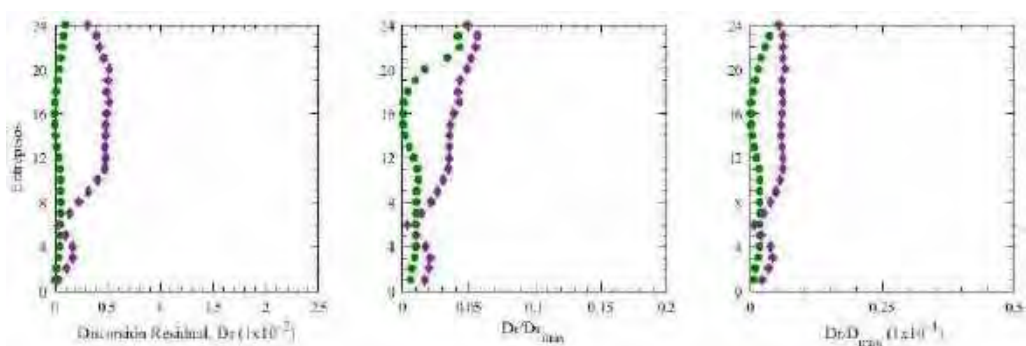


Figura H.123. Distorsiones residuales, registros de aceleración CH84-A (2017)

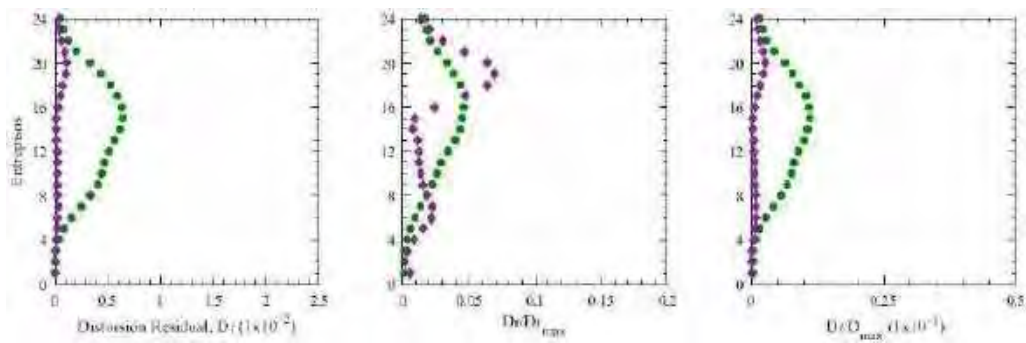


Figura H.124. Distorsiones residuales, registros de aceleración CH84-B (2017)

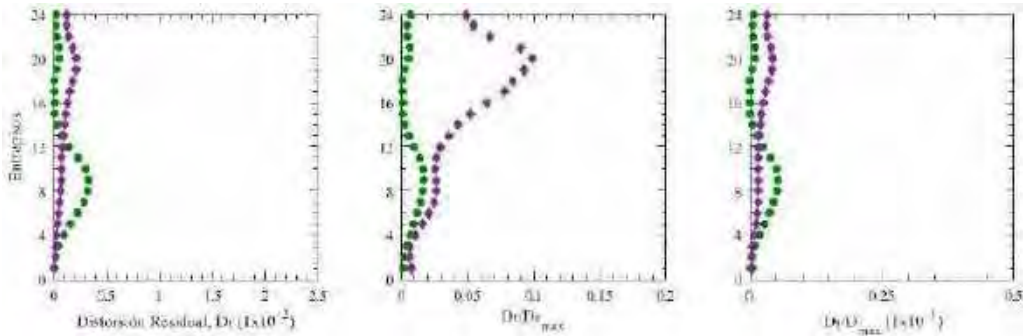


Figura H.125. Distorsiones residuales, registros de aceleración MI15-A (2017)

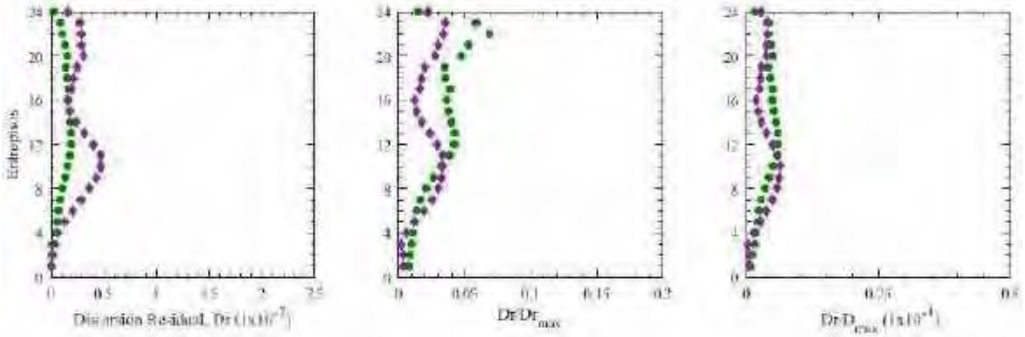


Figura H.126. Distorsiones residuales, registros de aceleración MI15-B (2017)

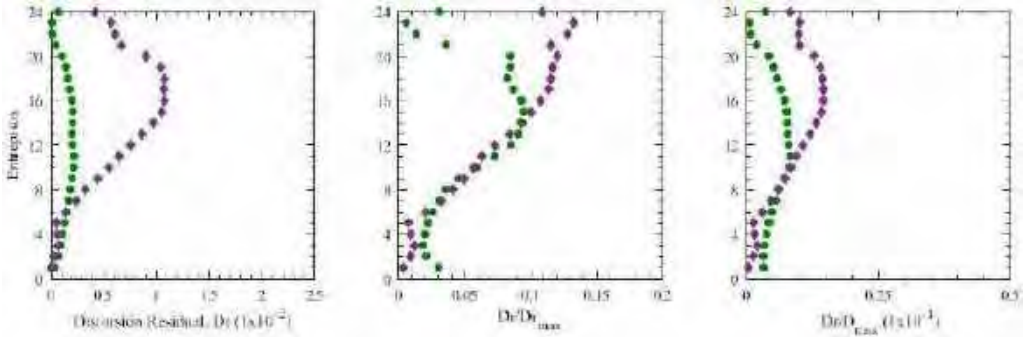


Figura H.127. Distorsiones residuales, registros de aceleración XO36-A (2017)

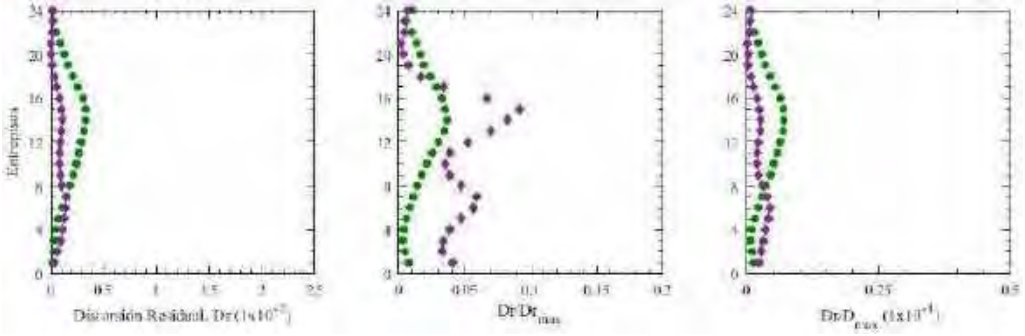
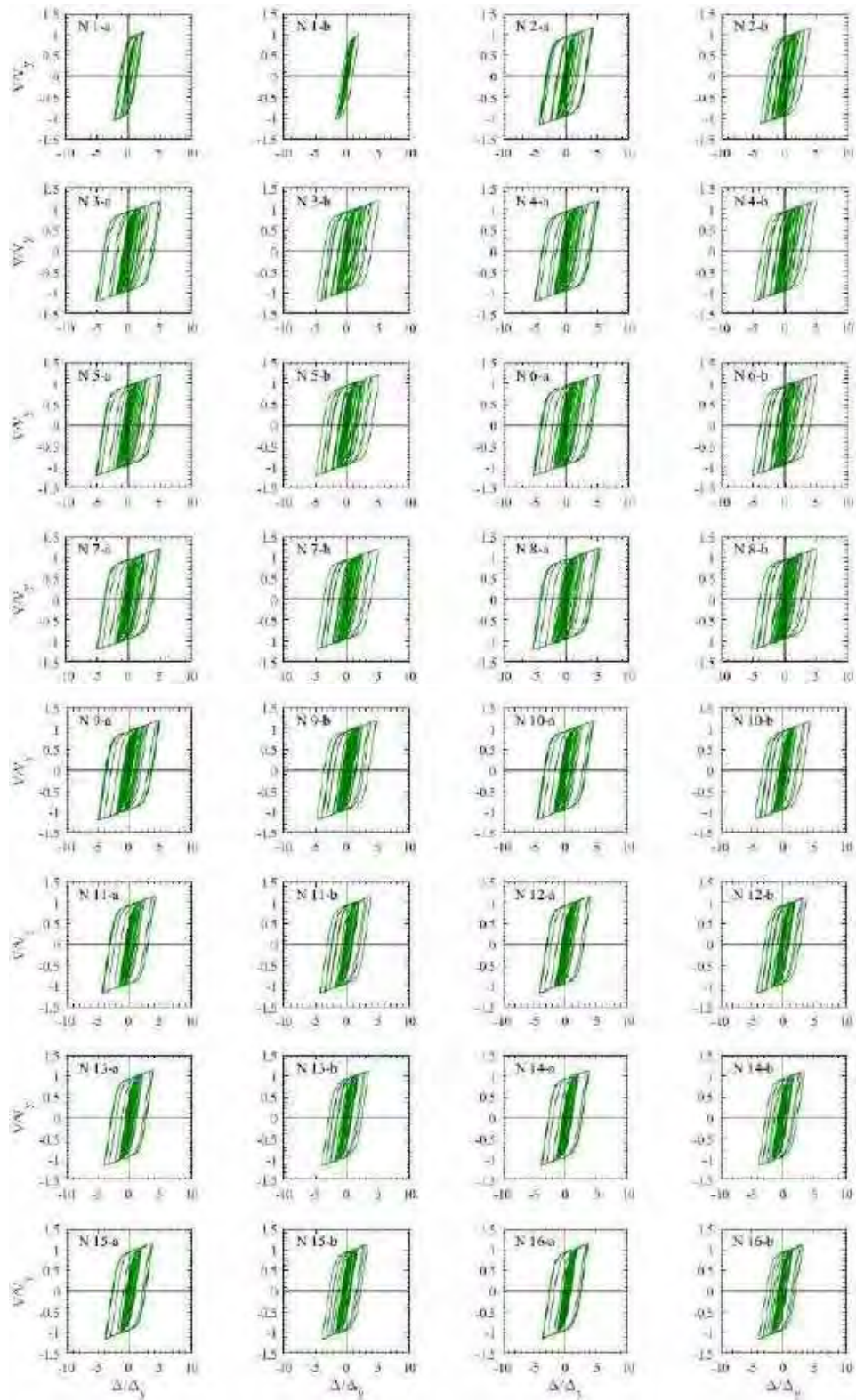


Figura H.128. Distorsiones residuales, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.2 Base Flexible

H.2.1 Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS



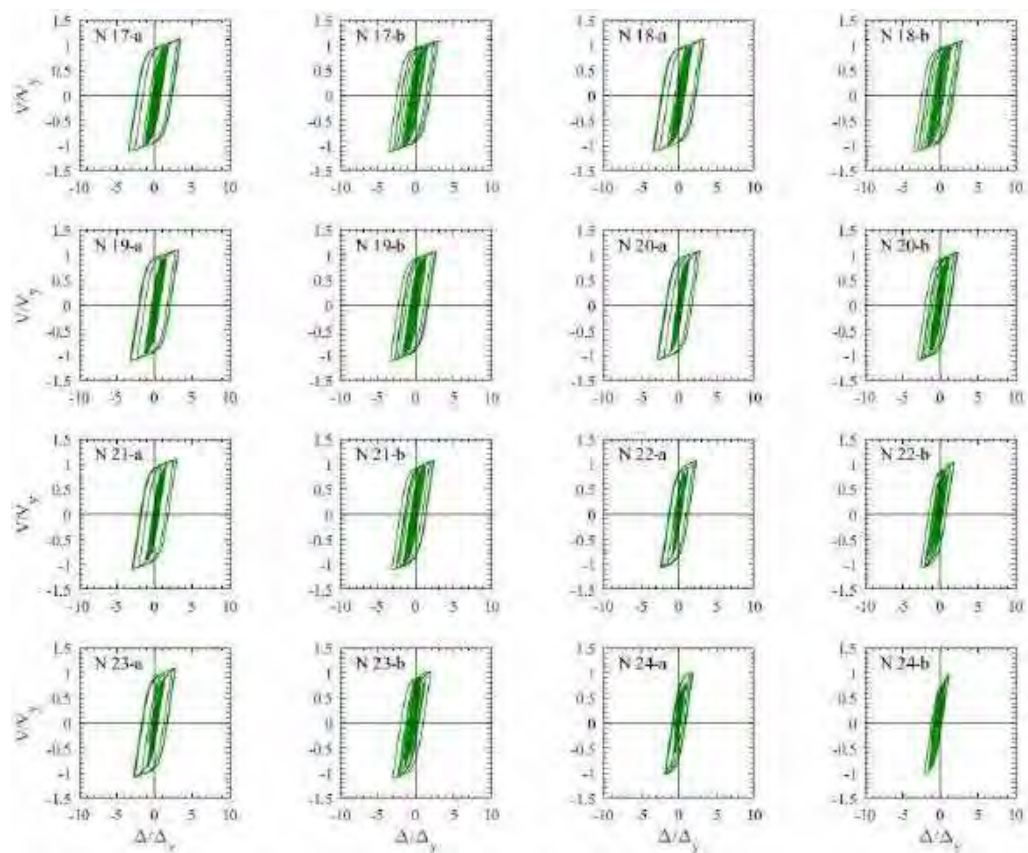
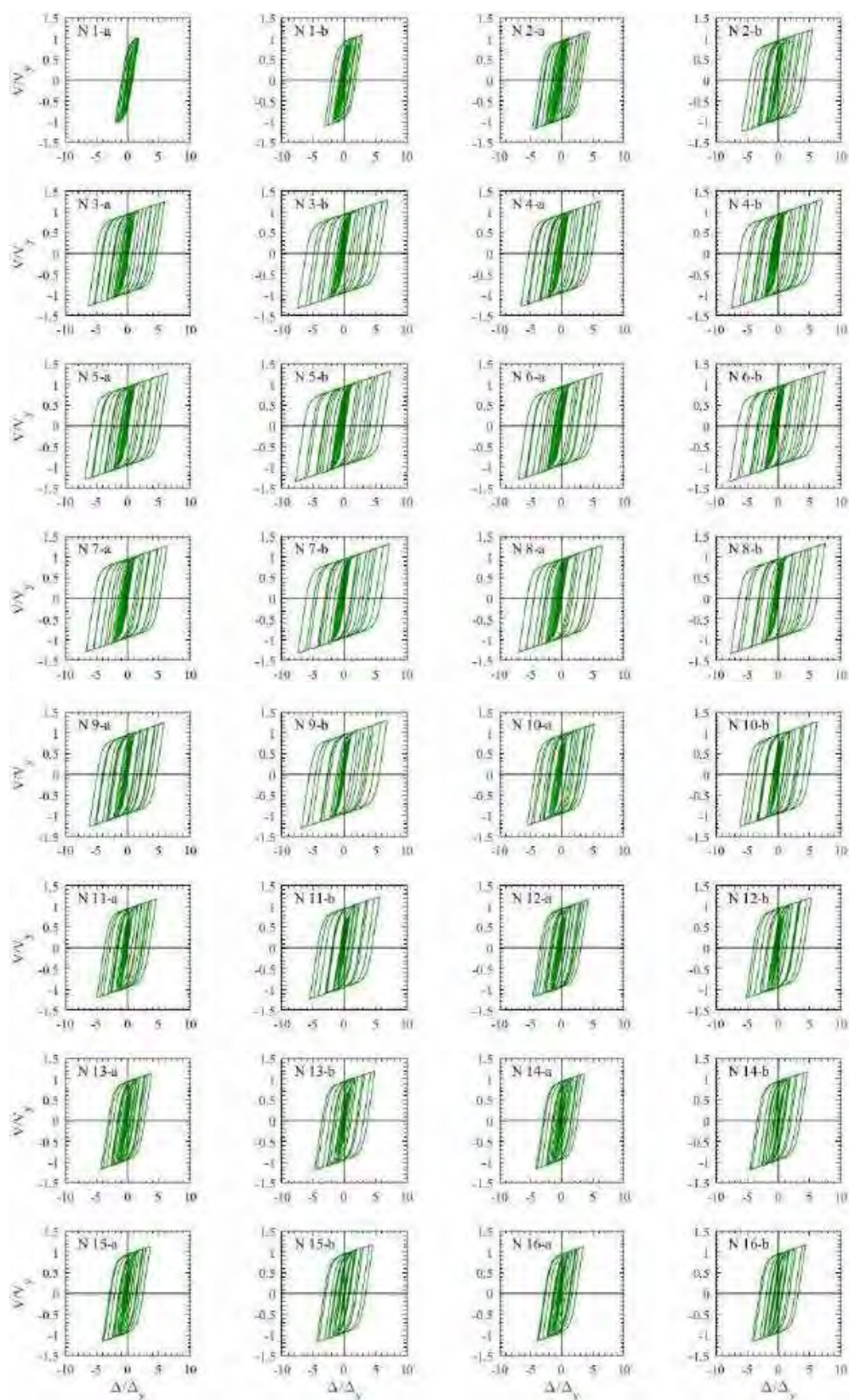


Figura H.129. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración TL08-A



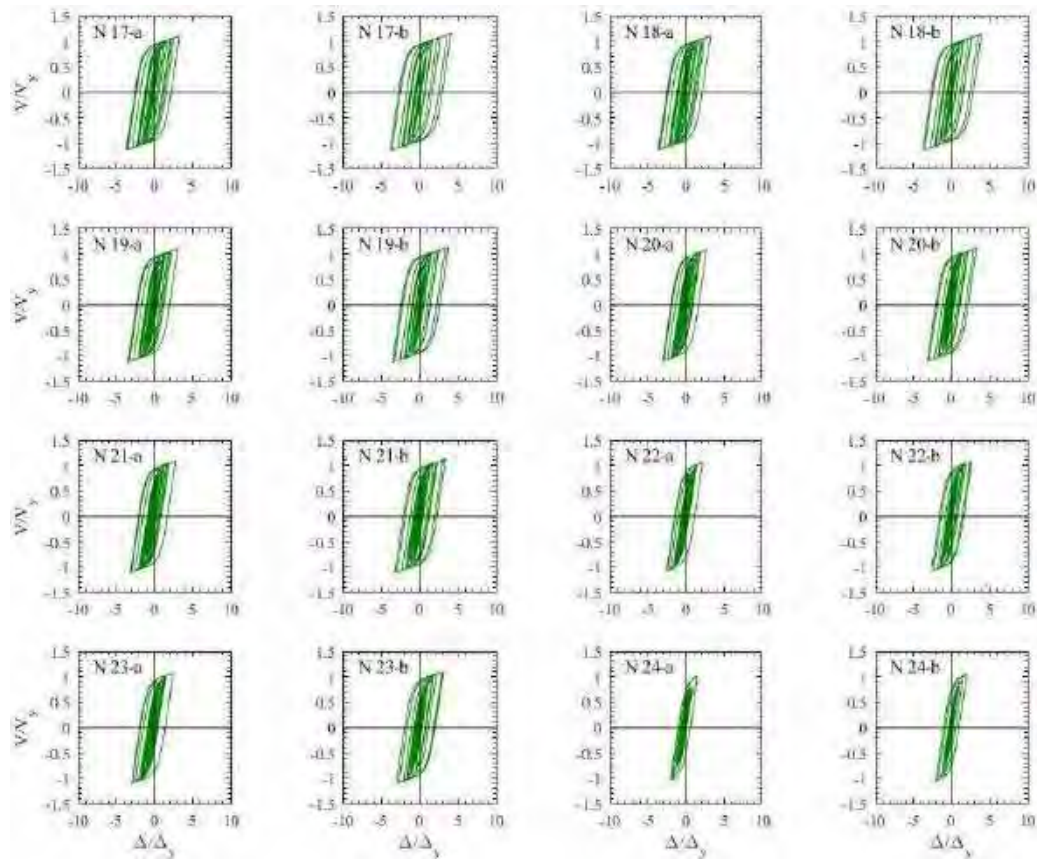
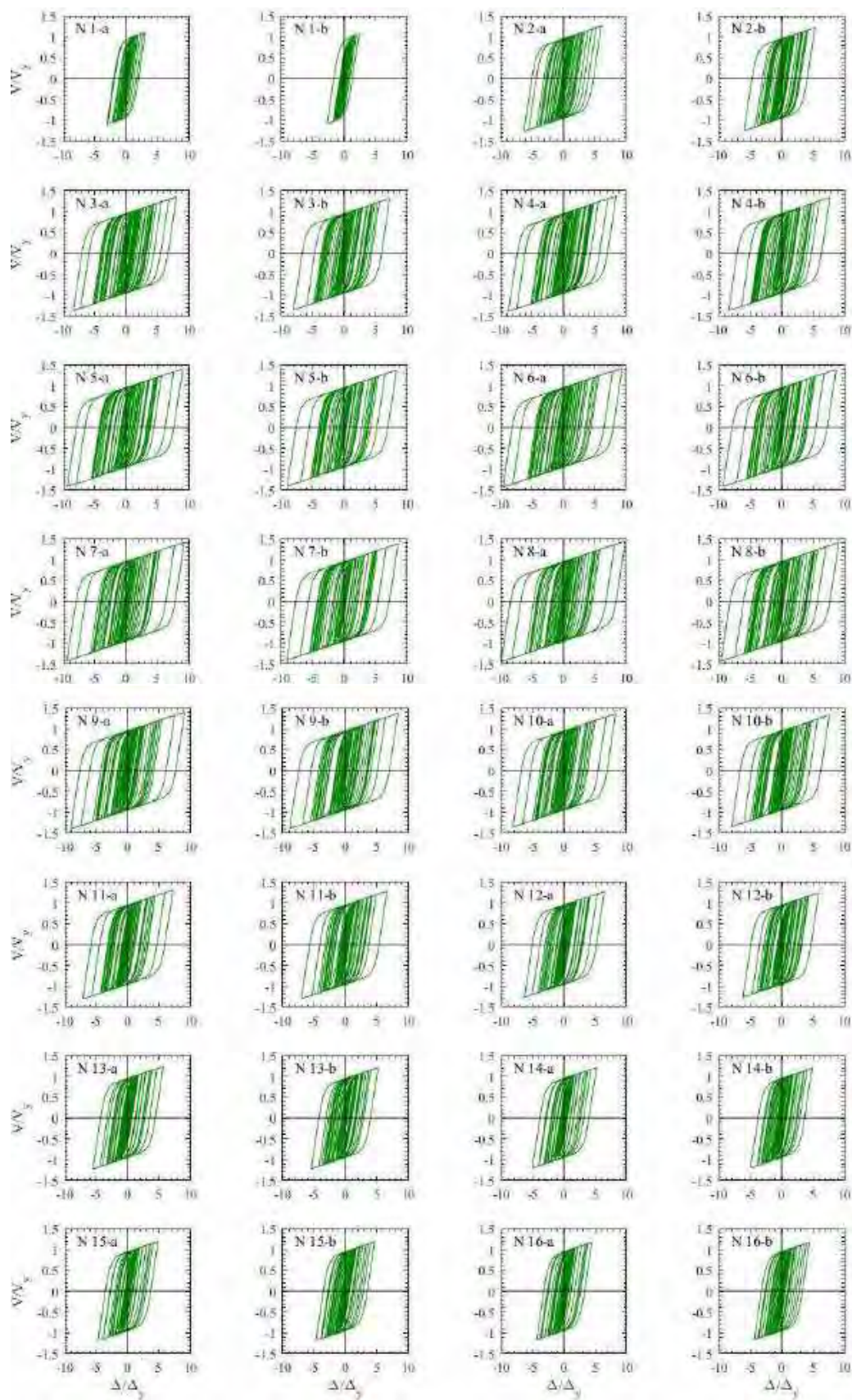


Figura H.130. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración TL08-B



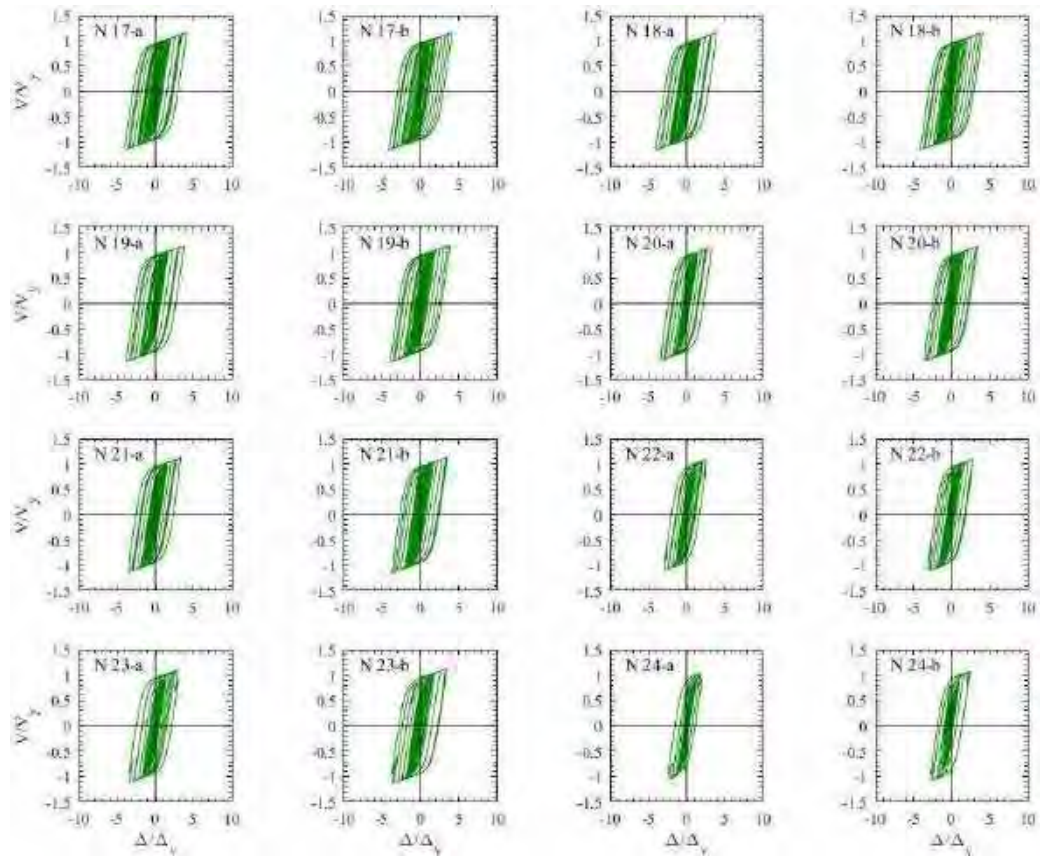
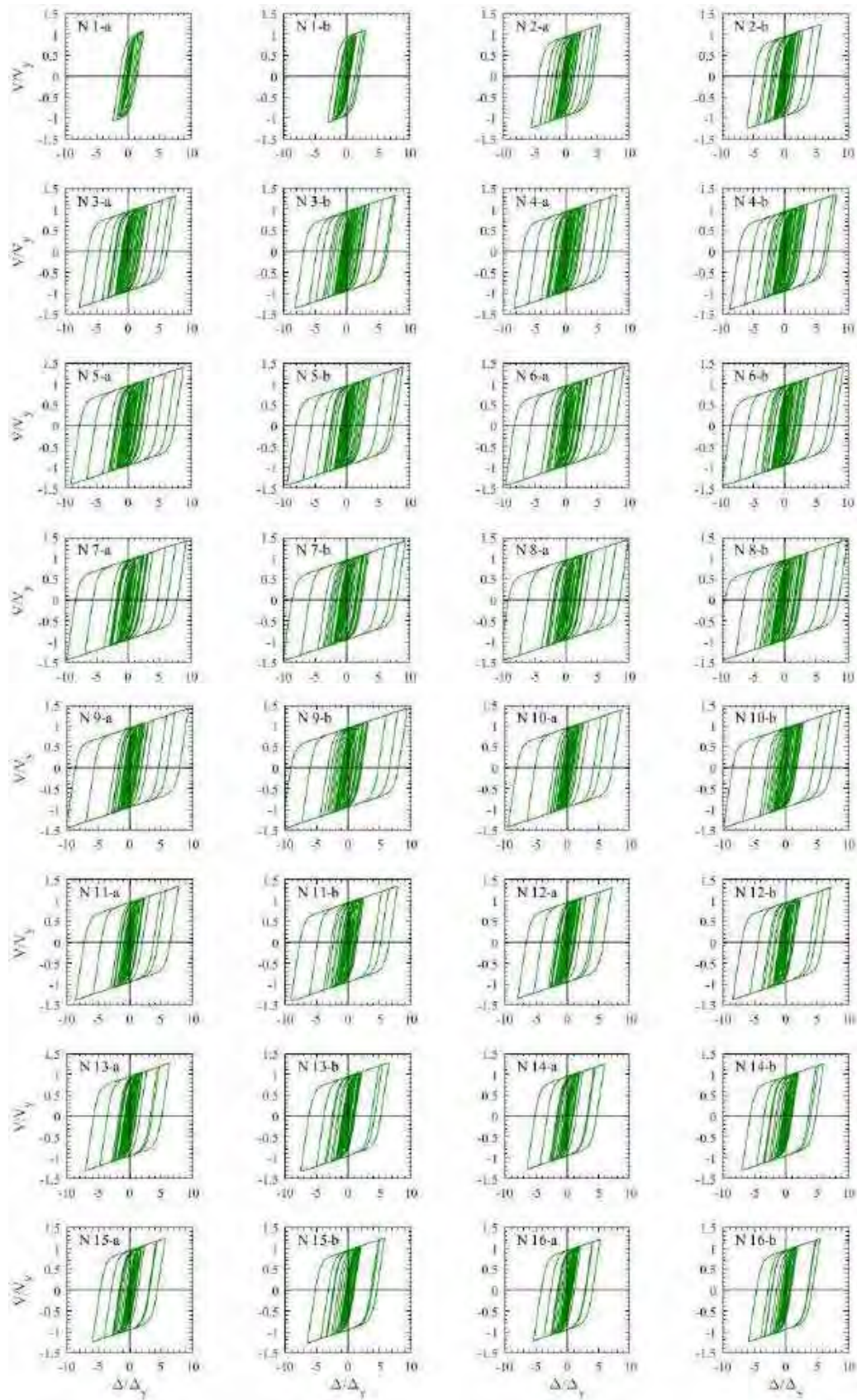


Figura H.131. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CJ03-A



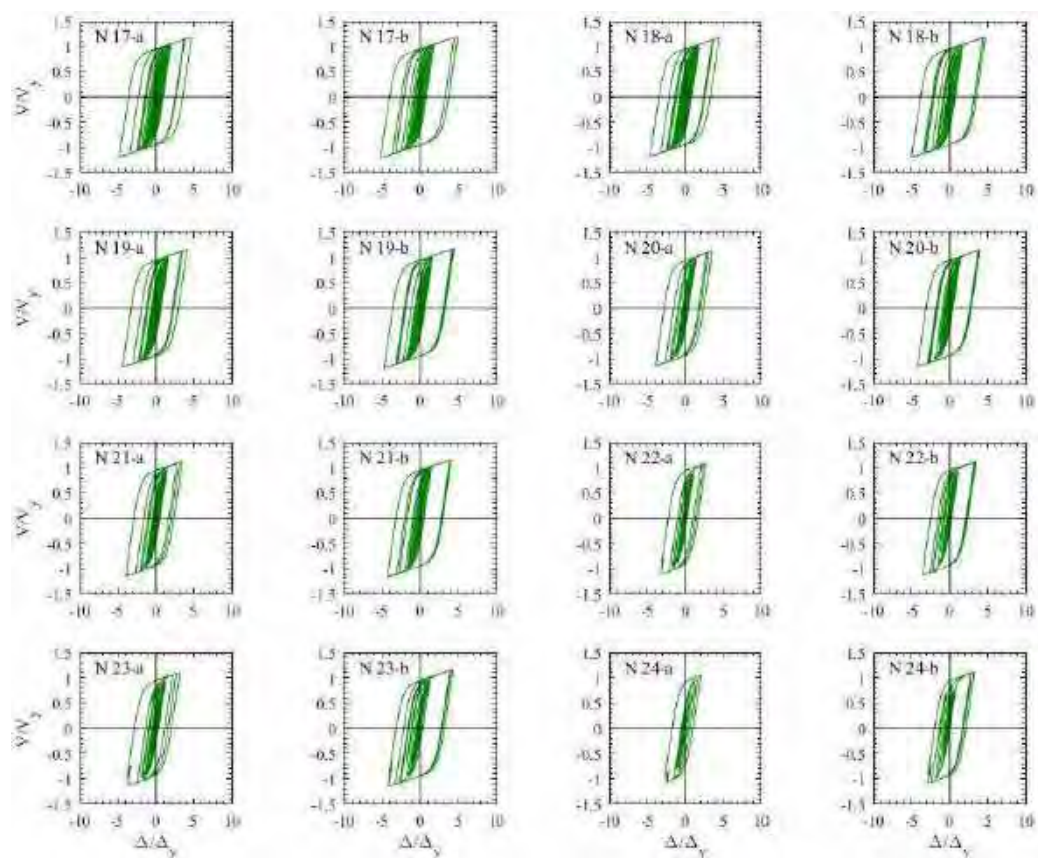
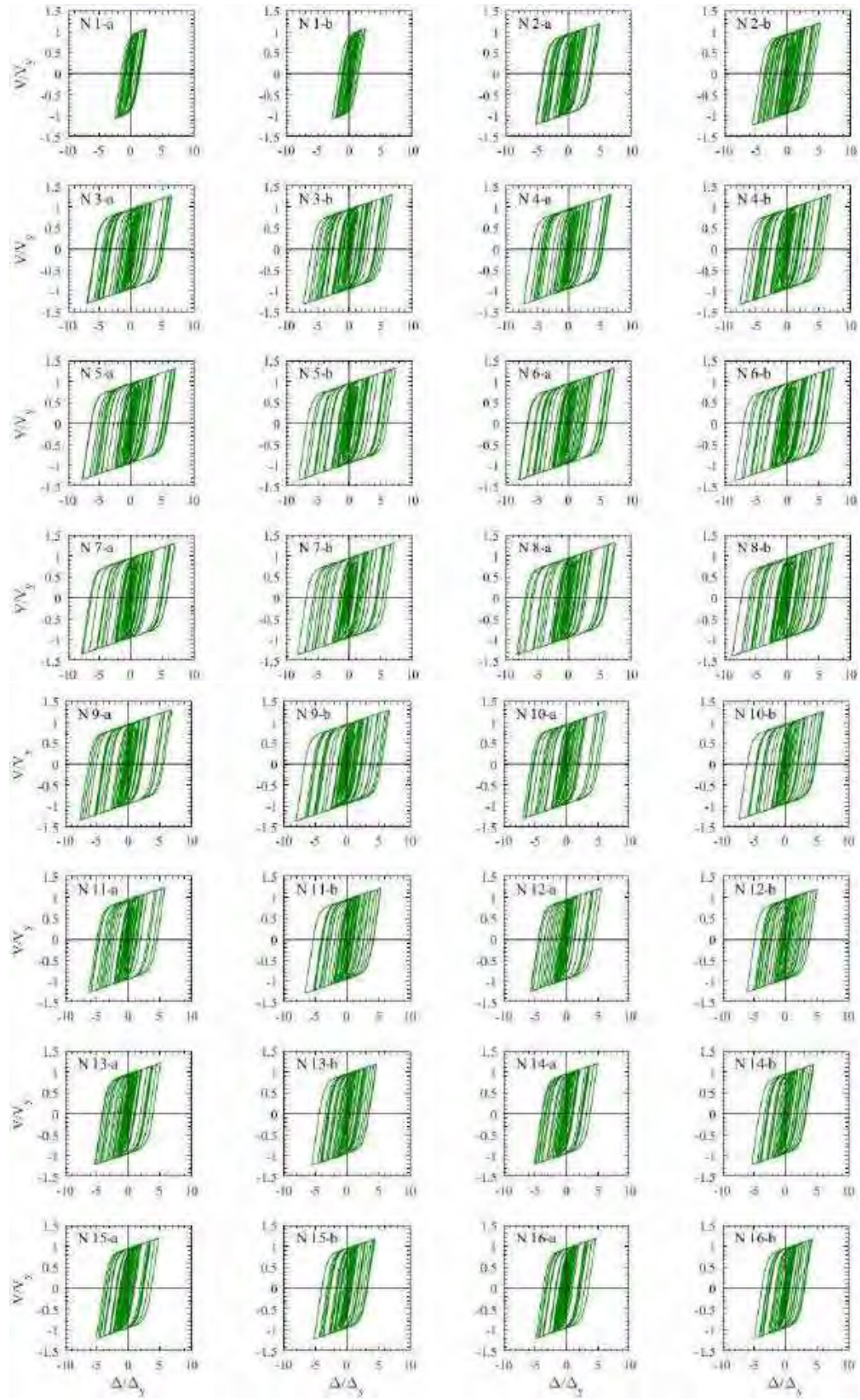


Figura H.132. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CJ03-B



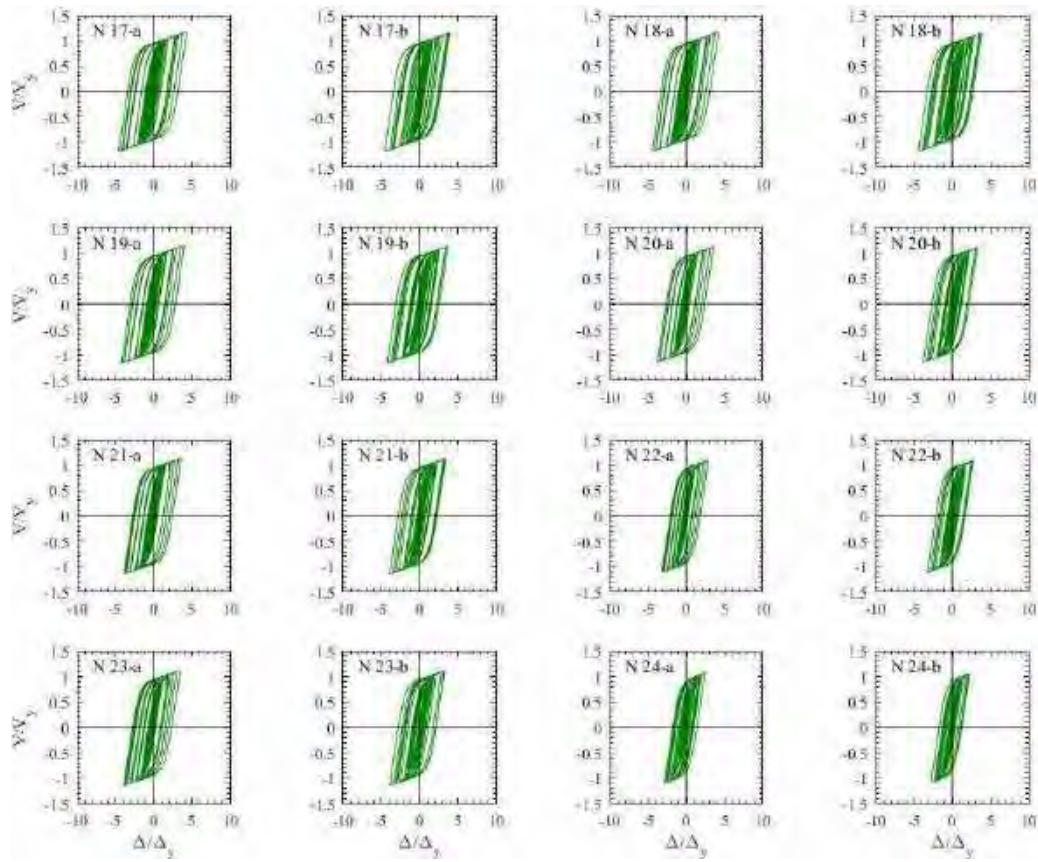
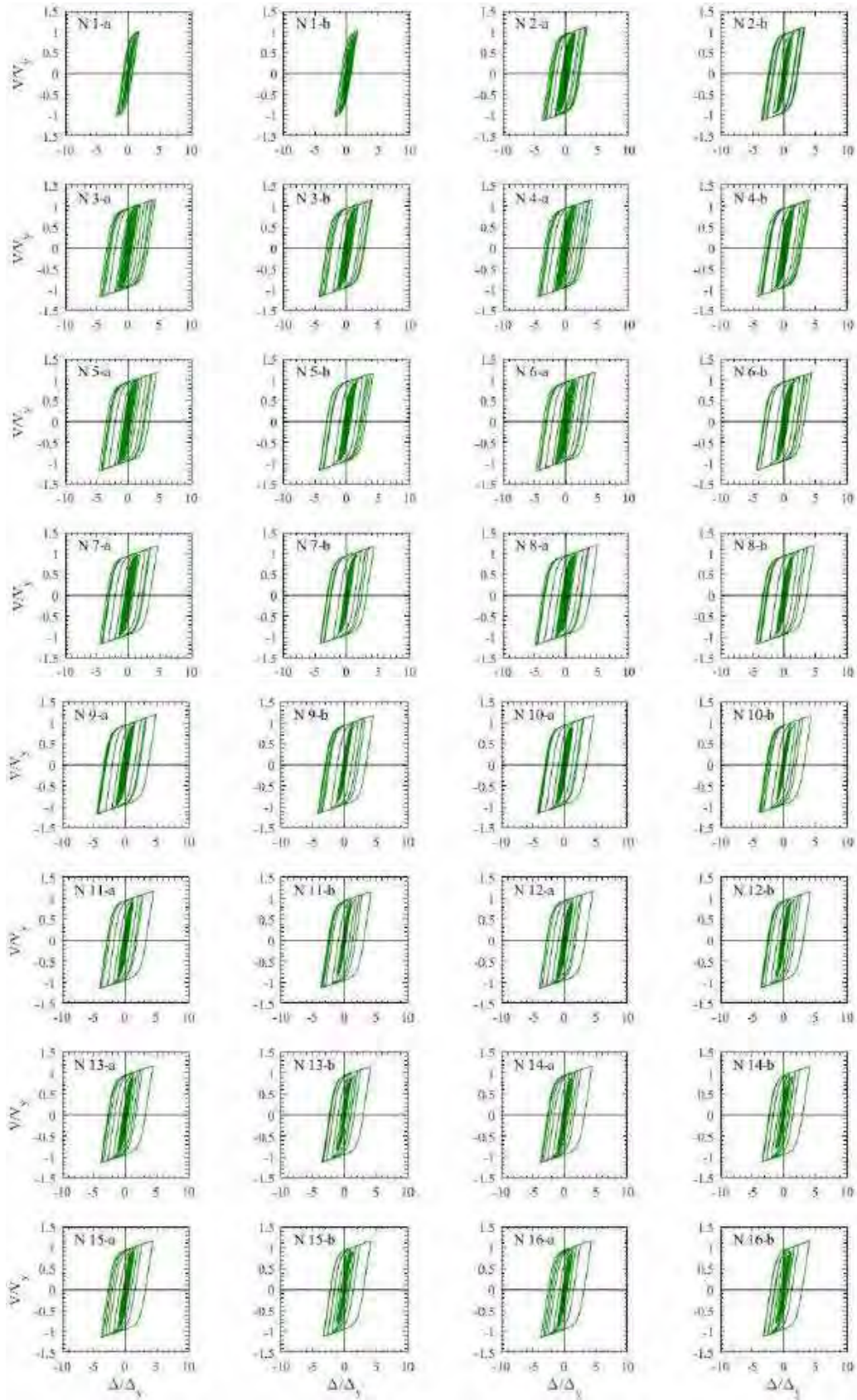


Figura H.133. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración ALAM85-A



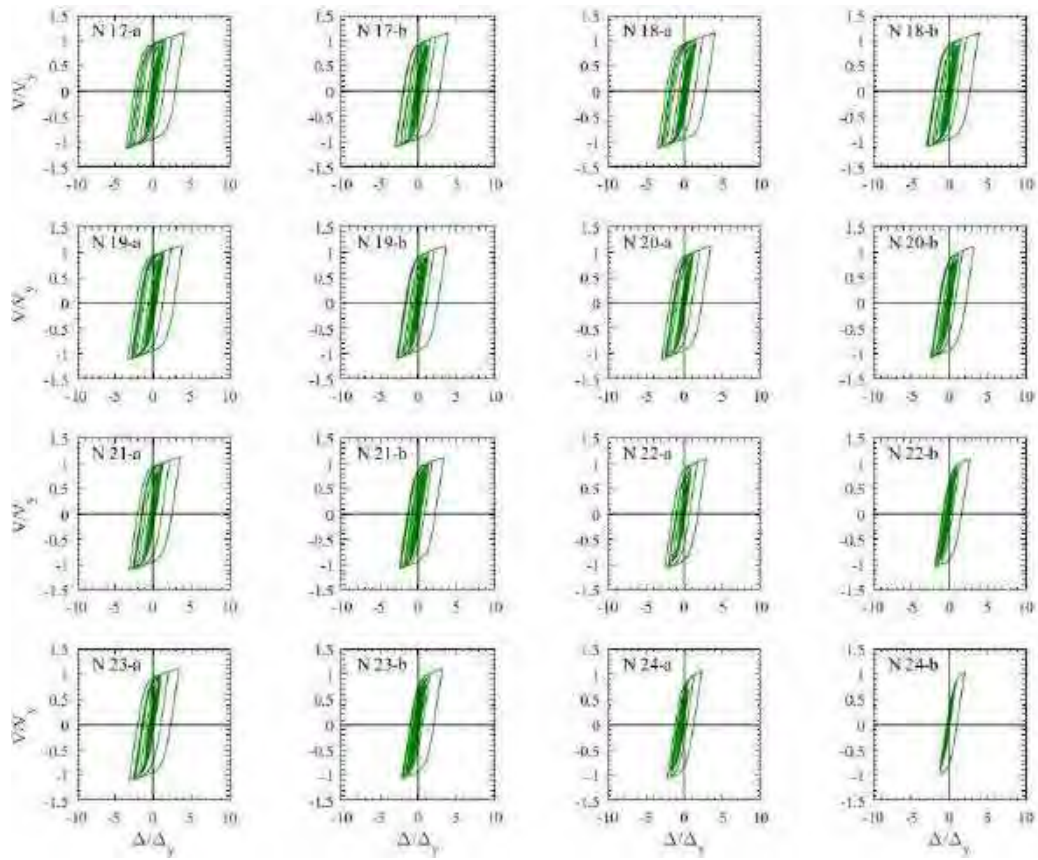
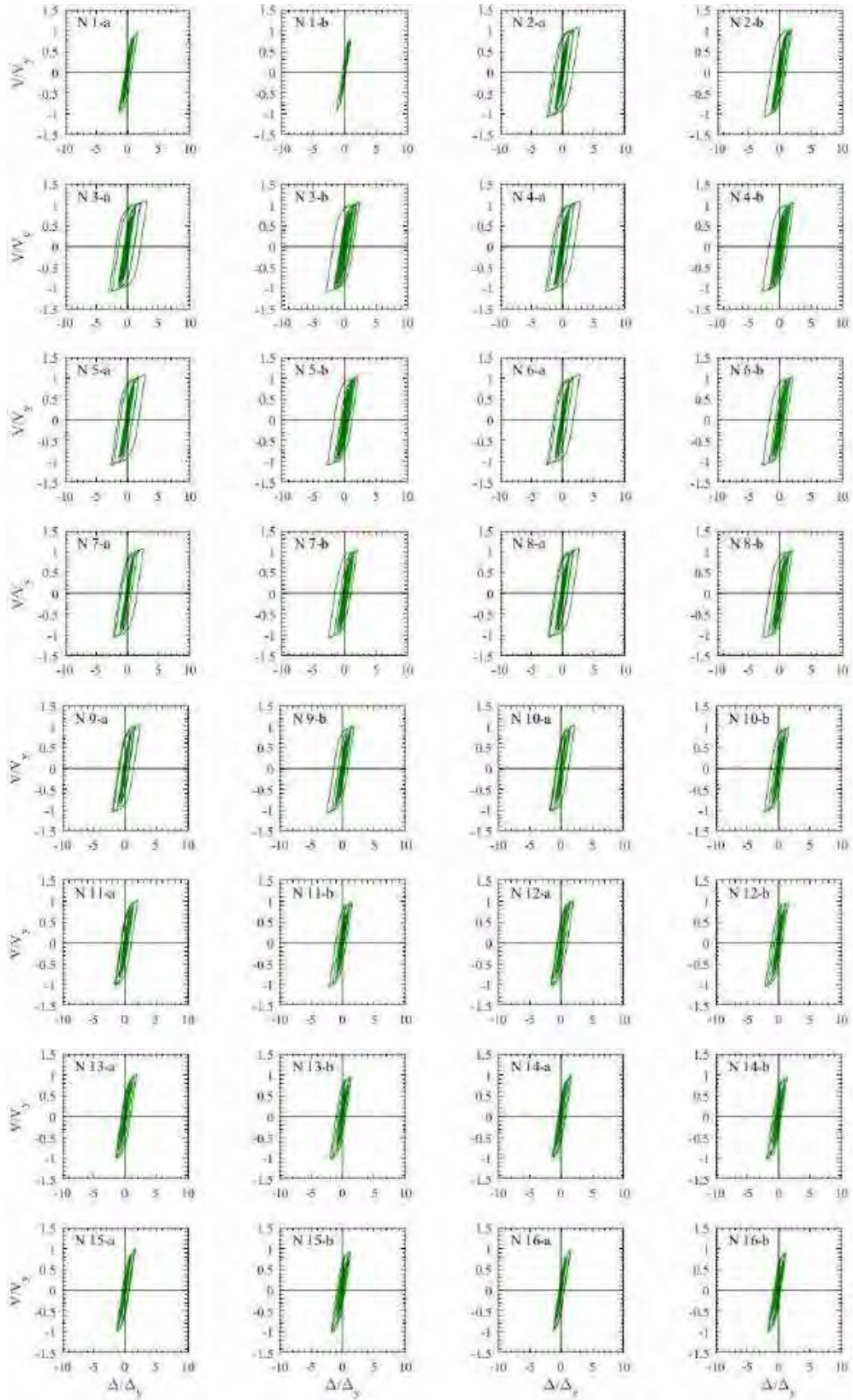


Figura H.134. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración ALAM85-B



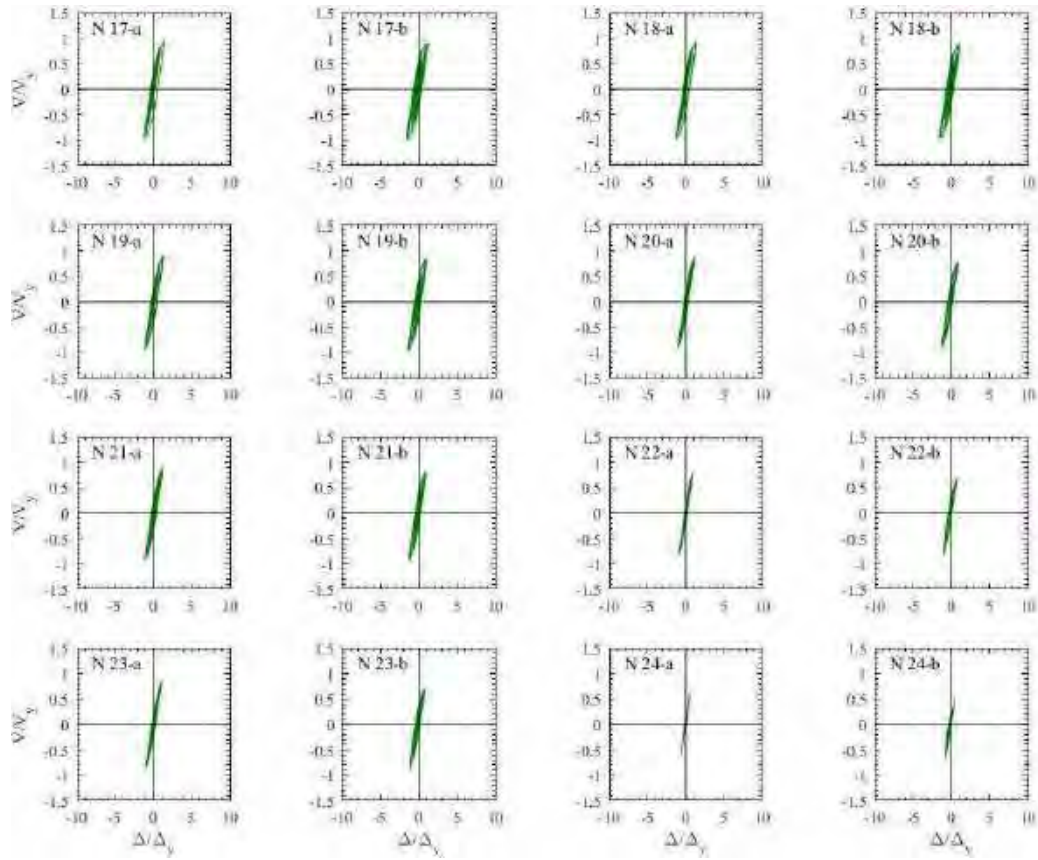
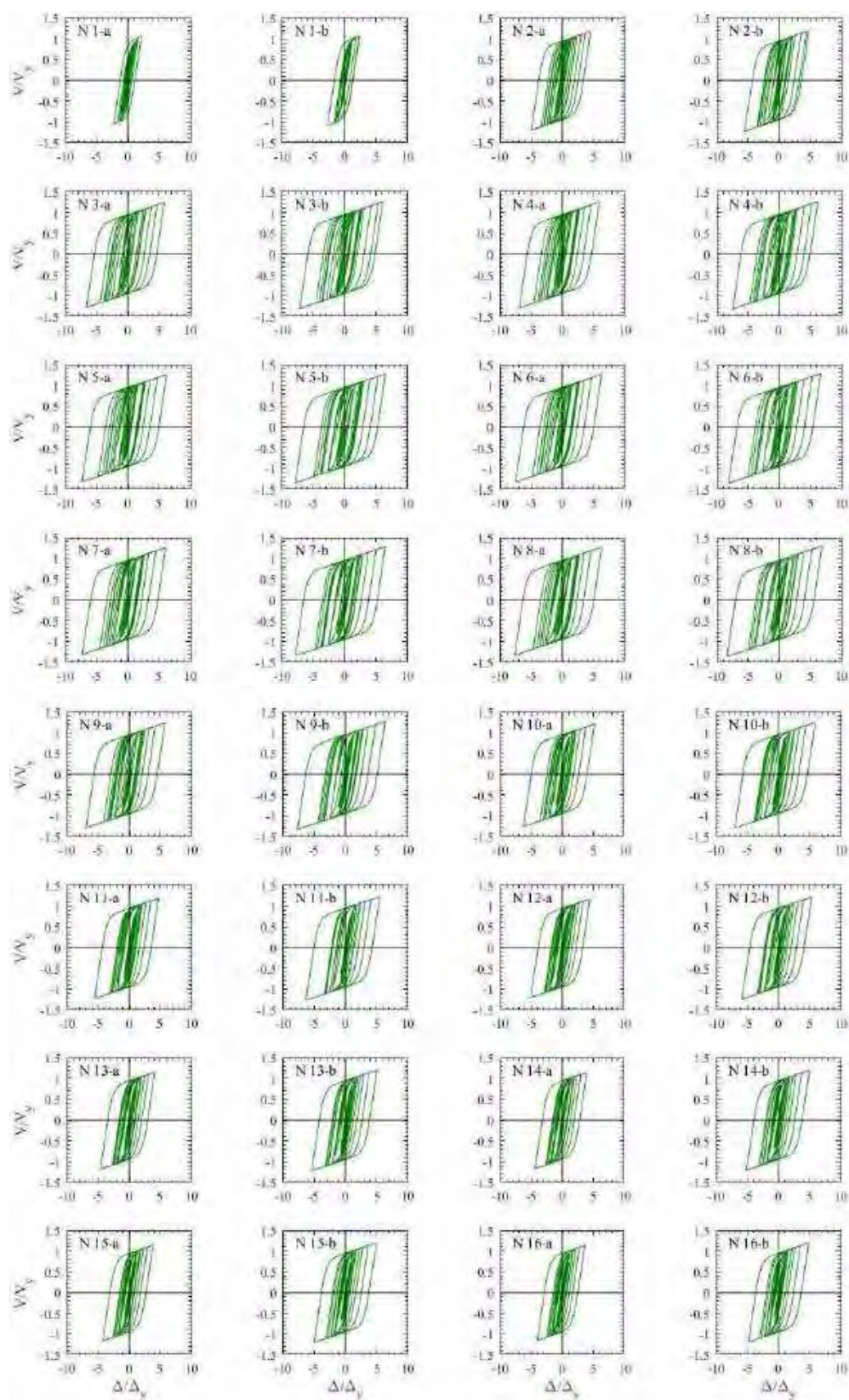


Figura H.135. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración TBOM-A (1985)



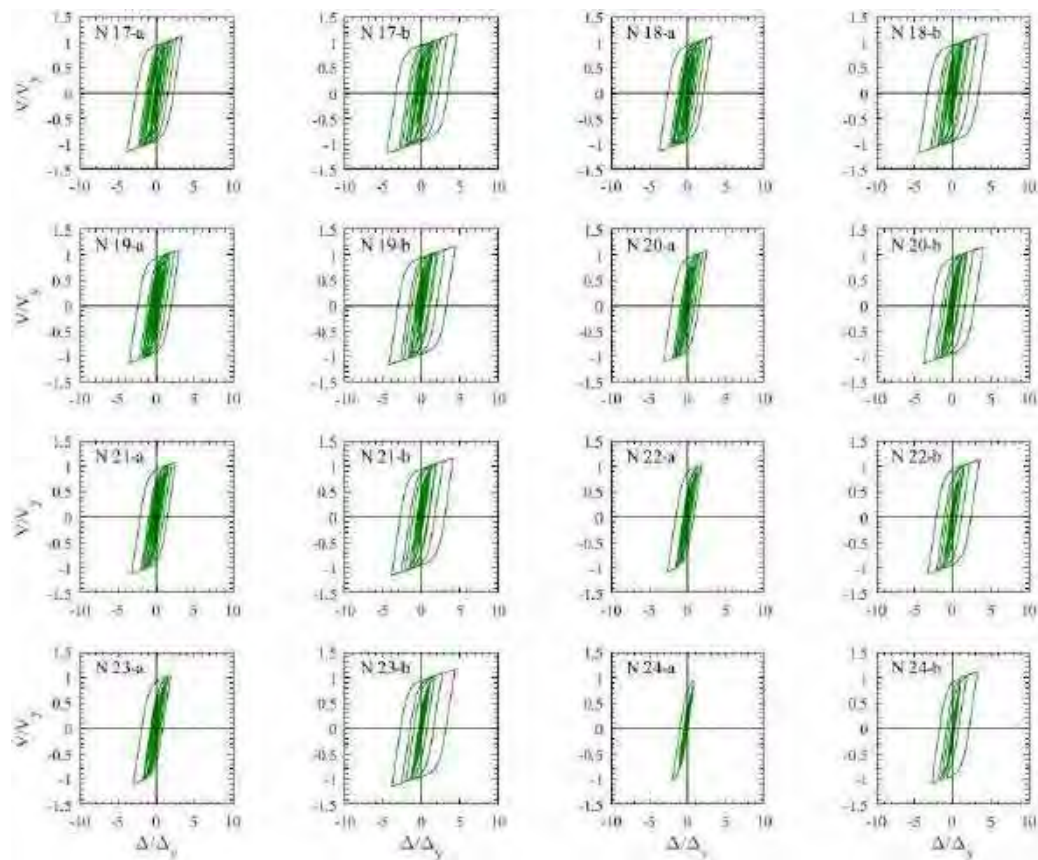
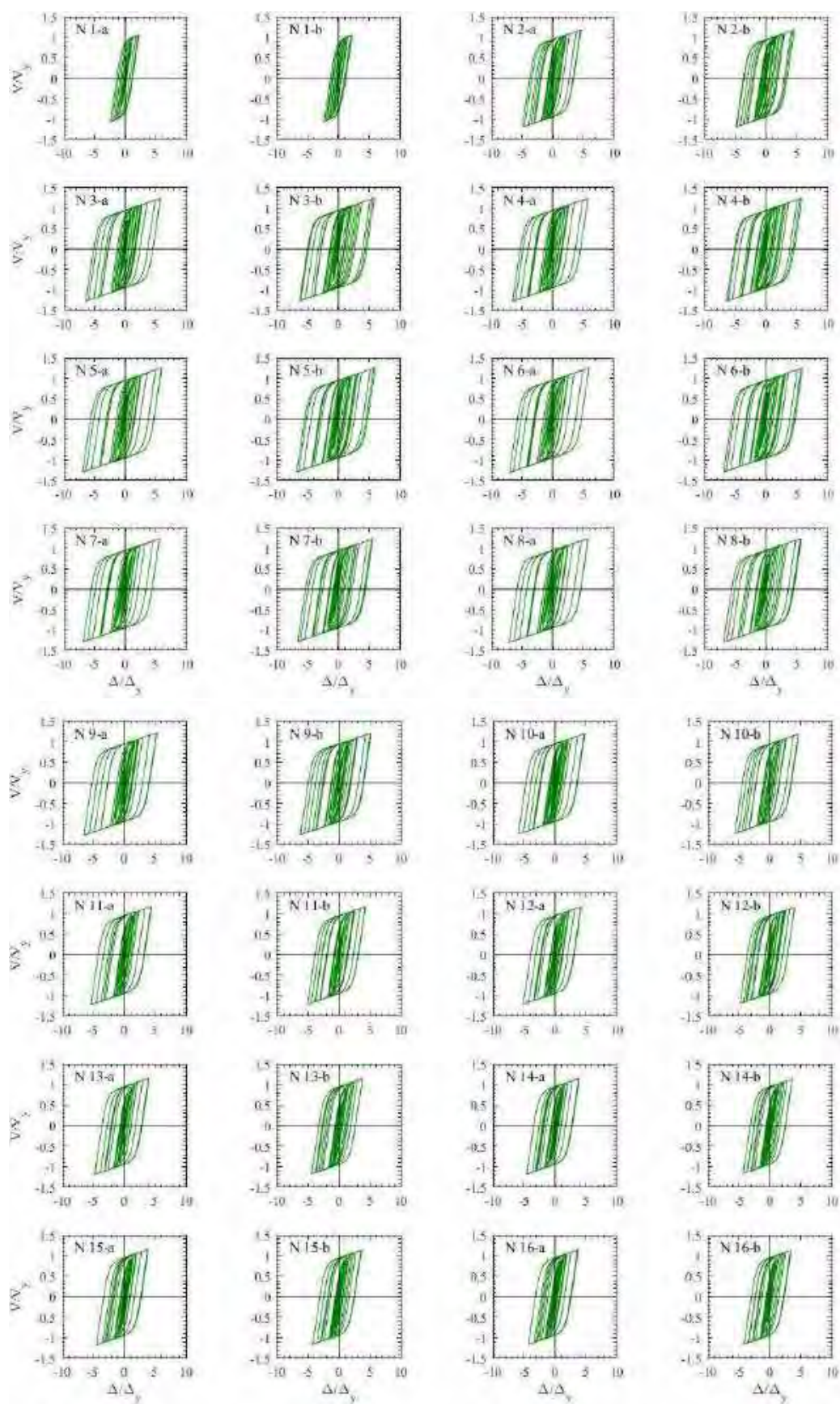


Figura H.136. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración TBOM –B (1985)



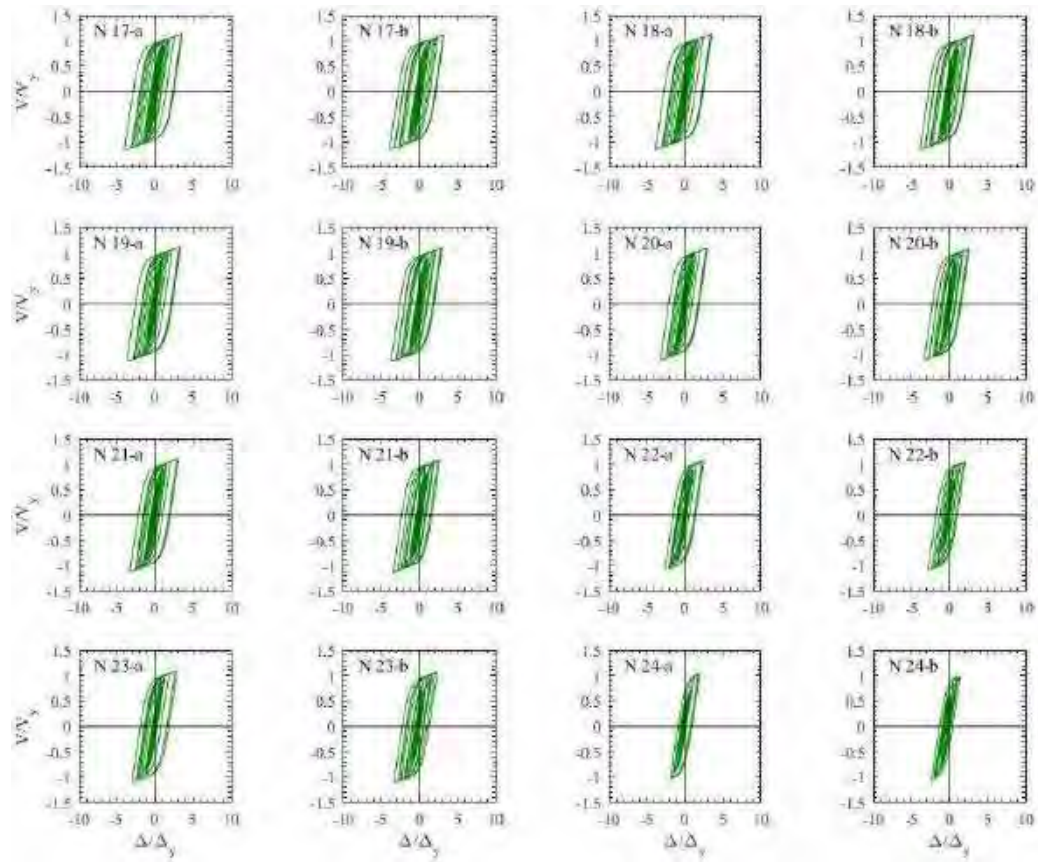
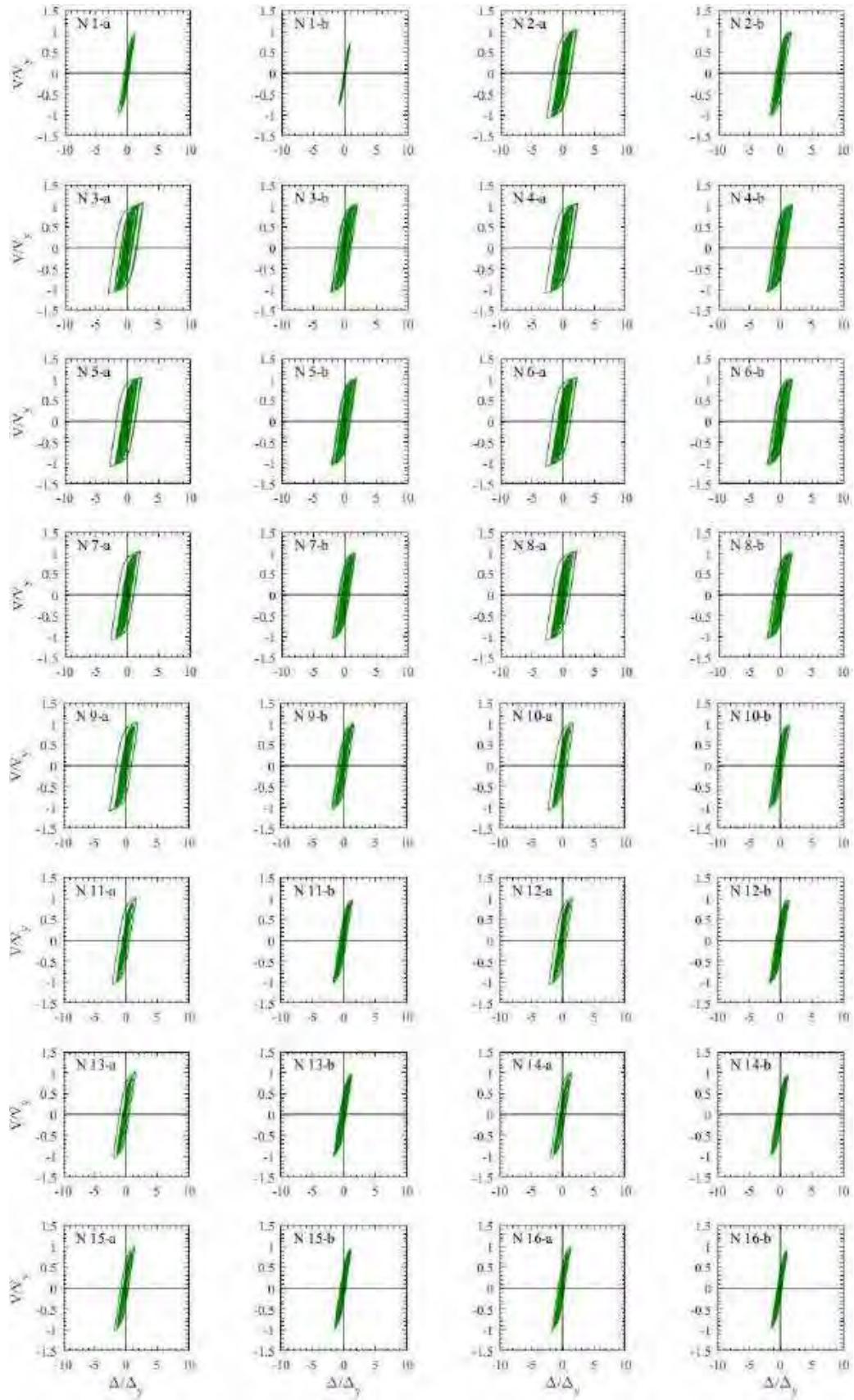


Figura H.137. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SCT185-A (1985)



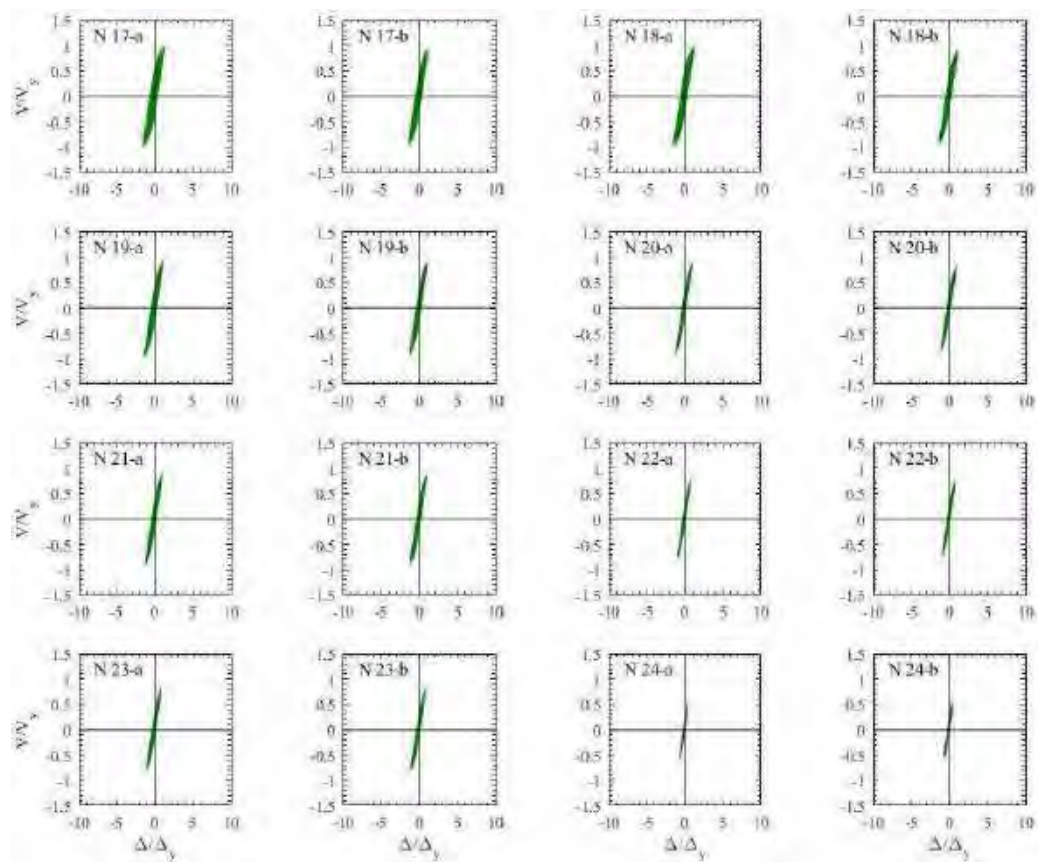
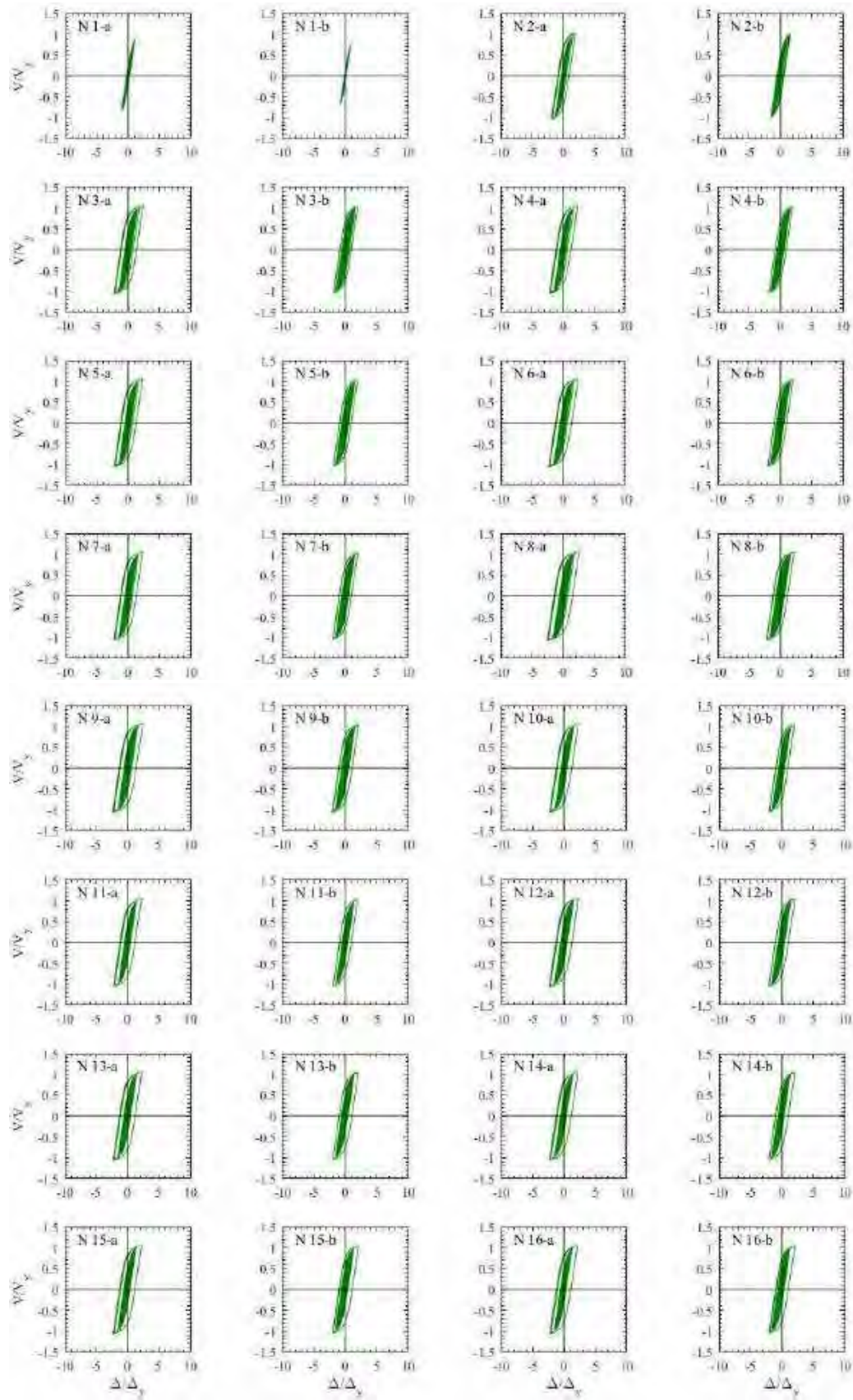


Figura H.138. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración SCT185-B (1985)



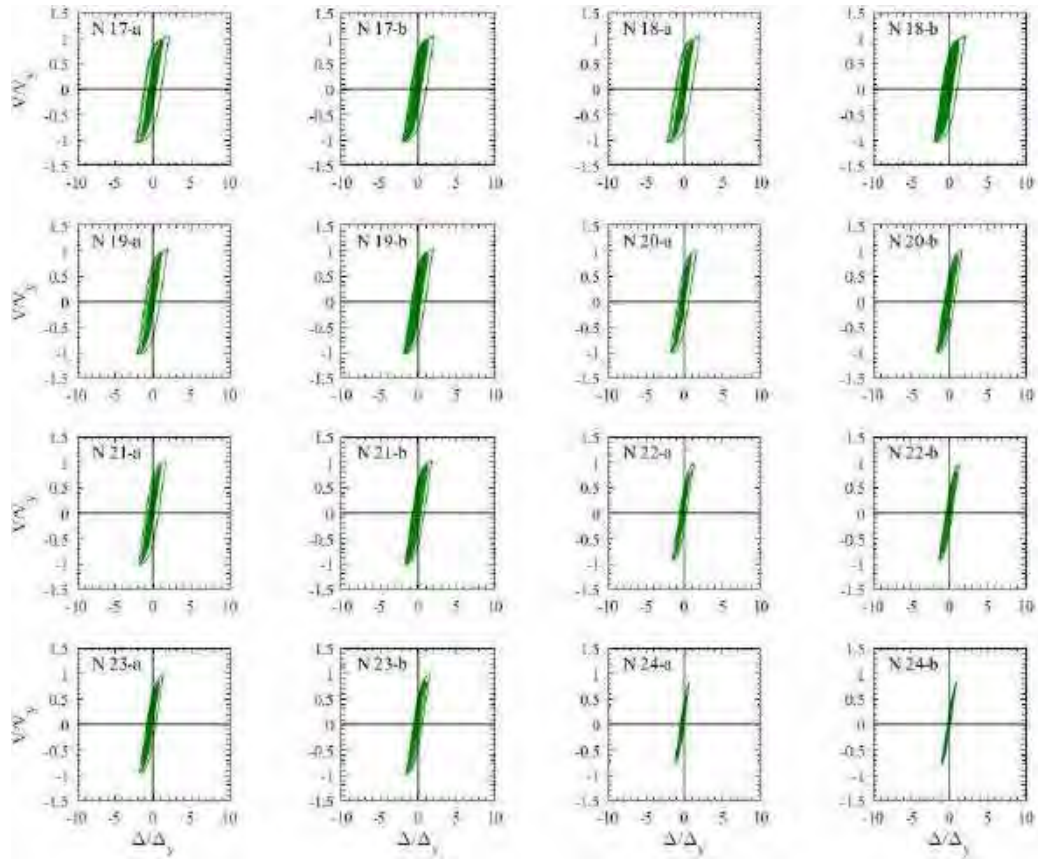
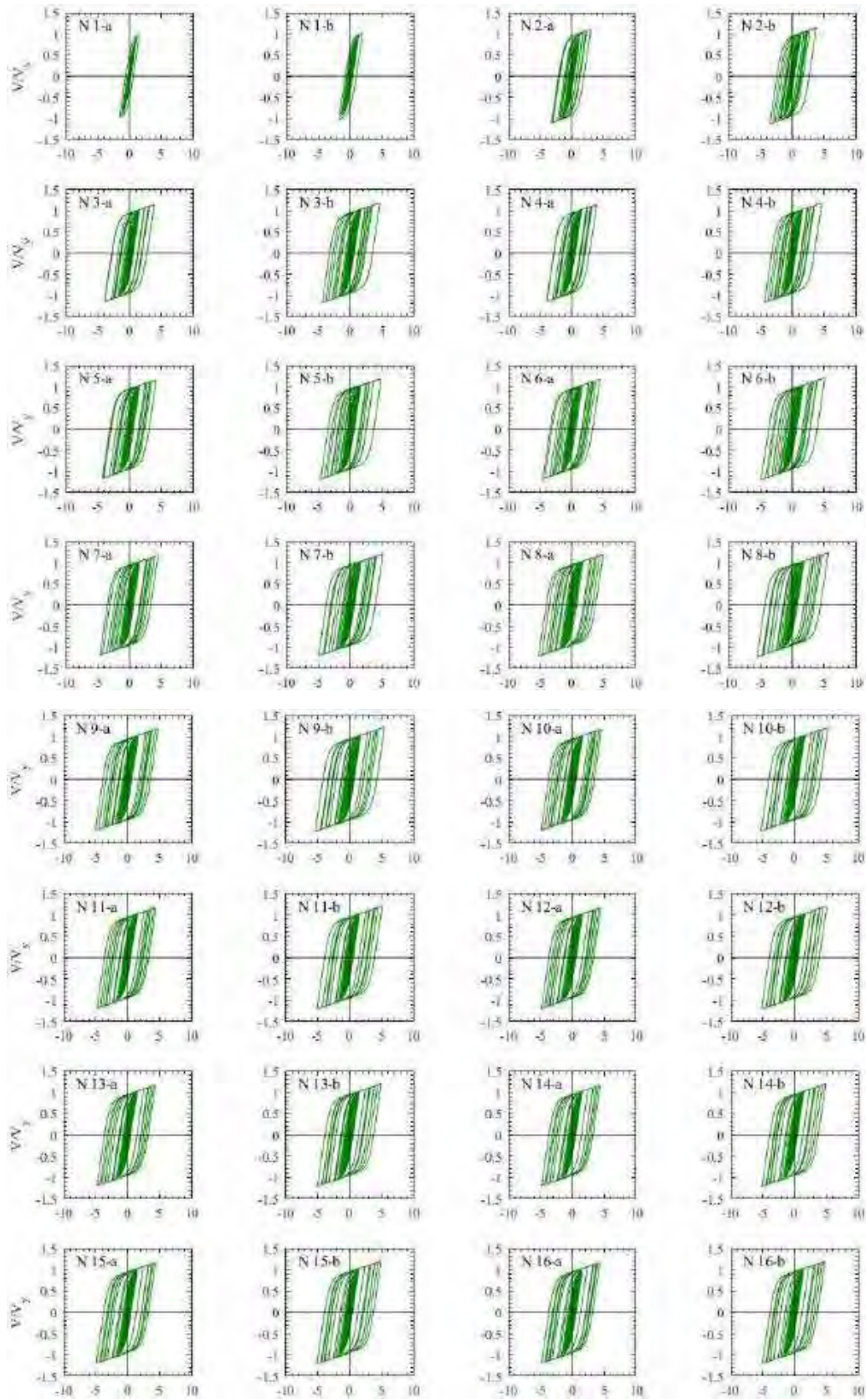


Figura H.139. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CH84-A (2017)



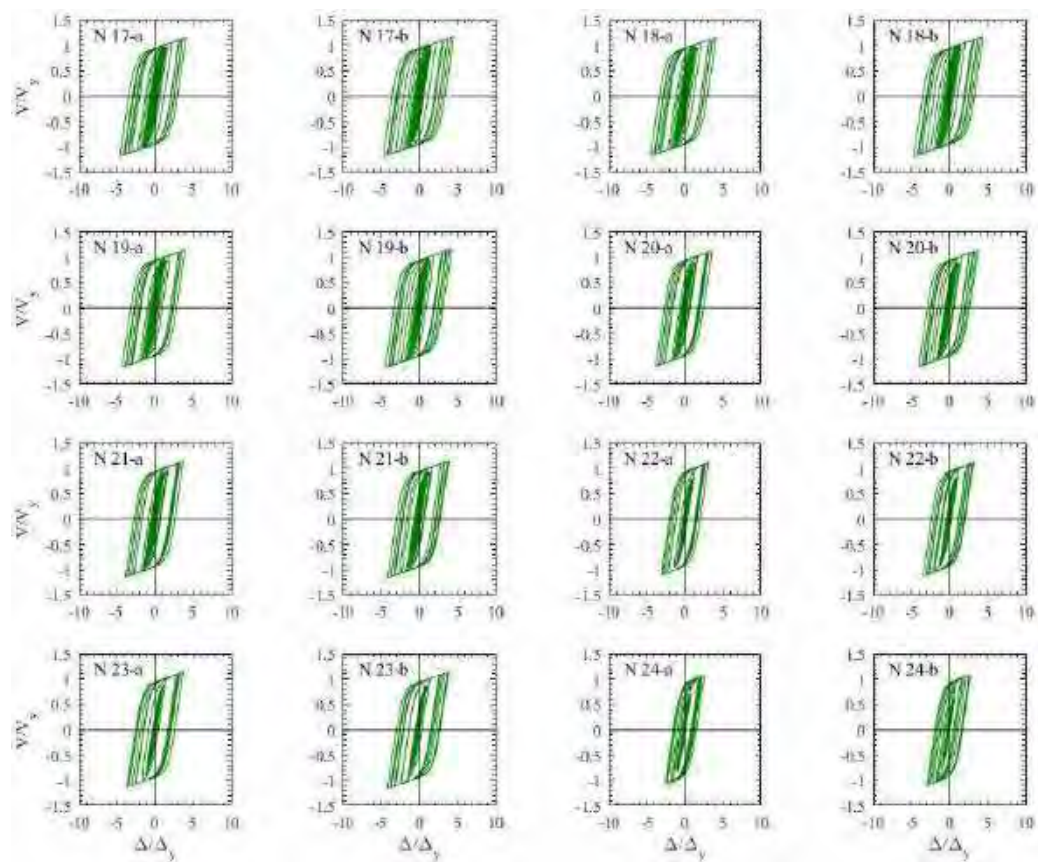
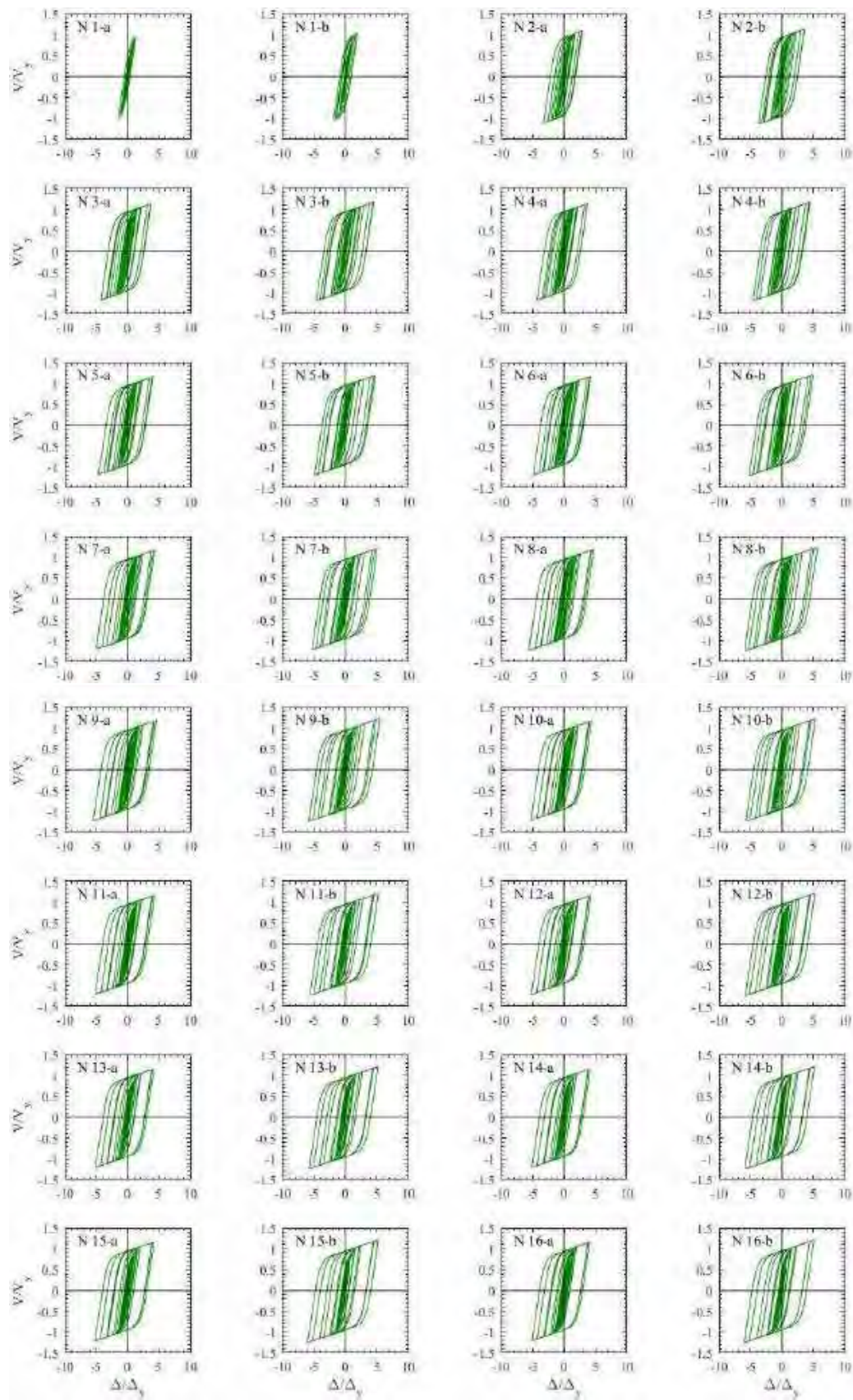


Figura H.140. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración CH84-B (2017)



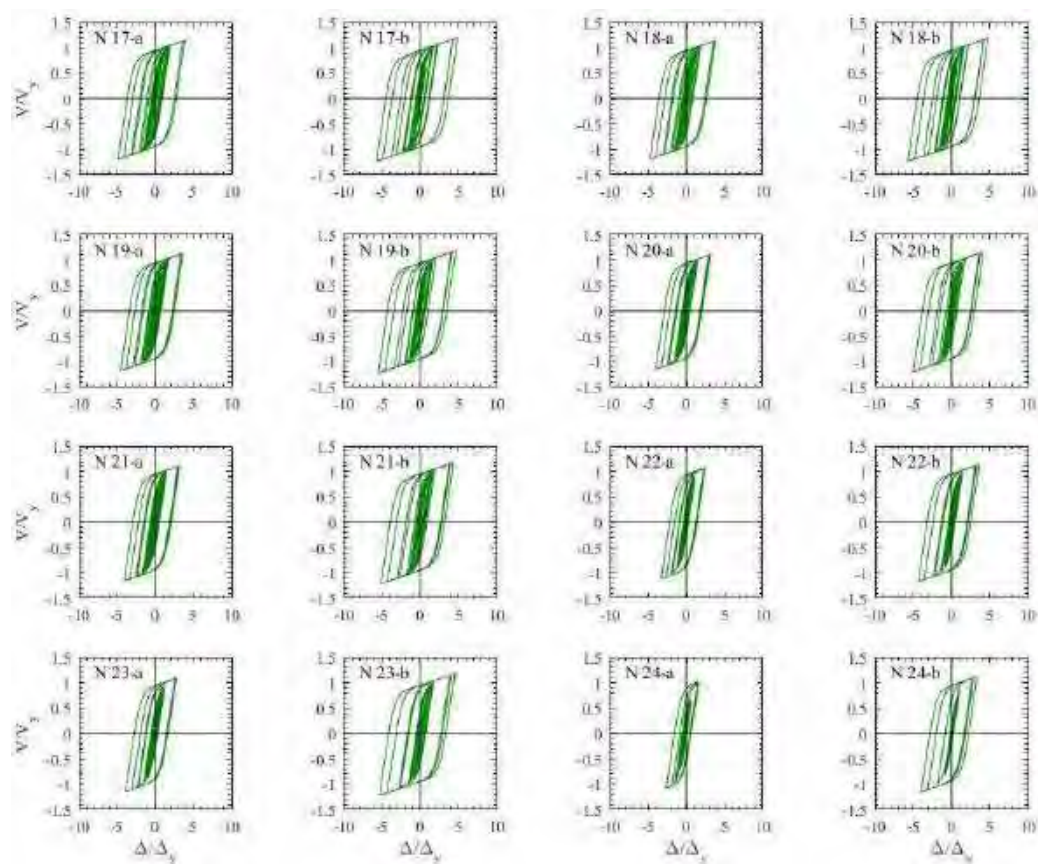
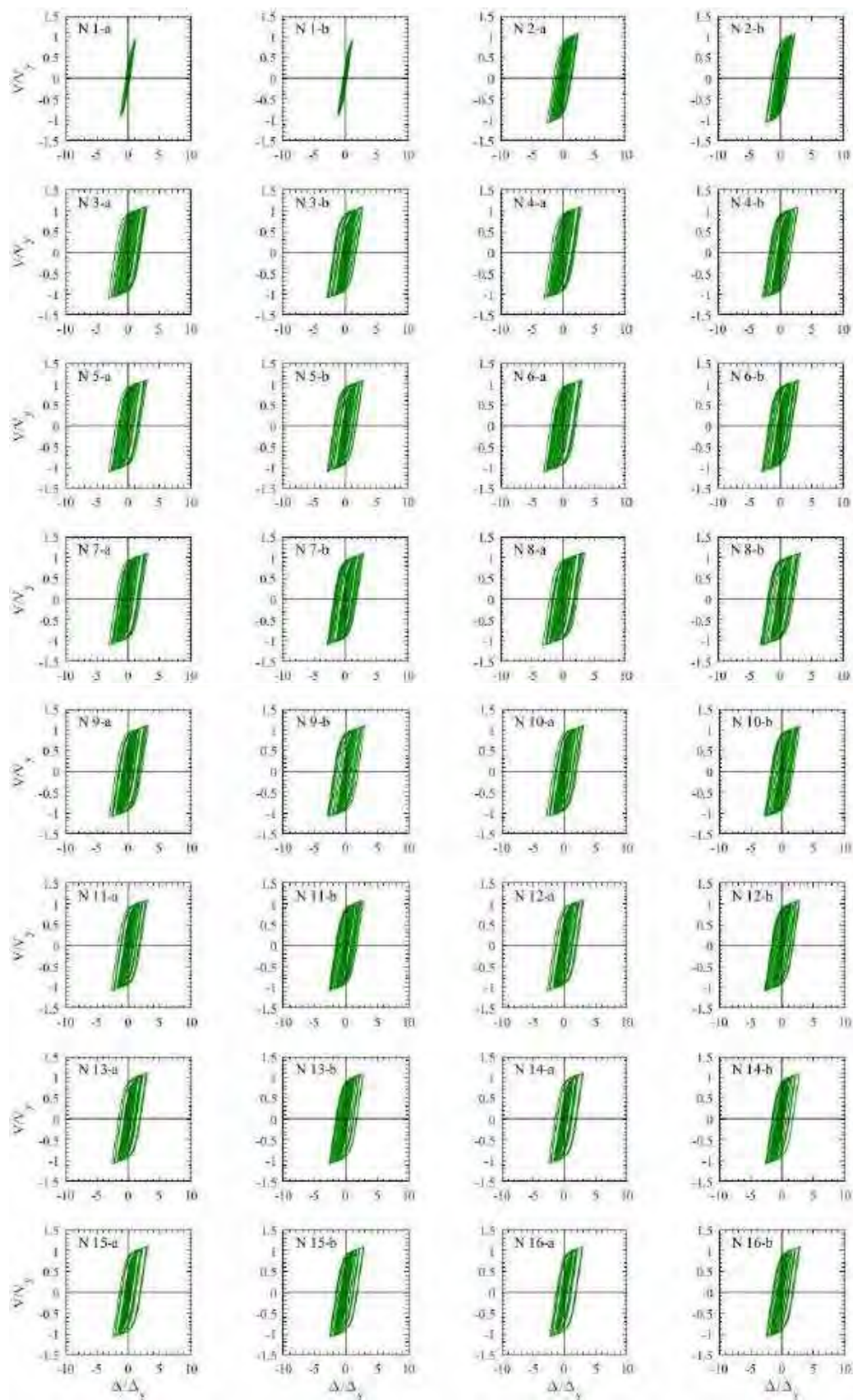


Figura H.141. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración MI15-A (2017)



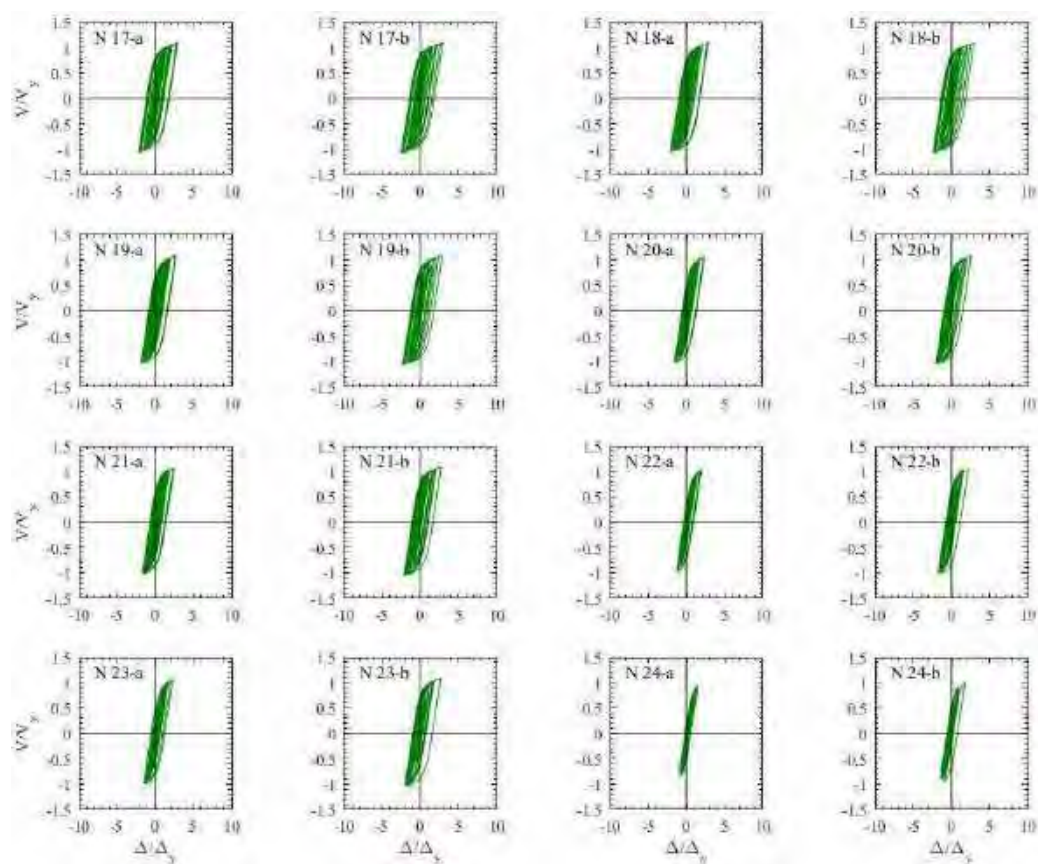
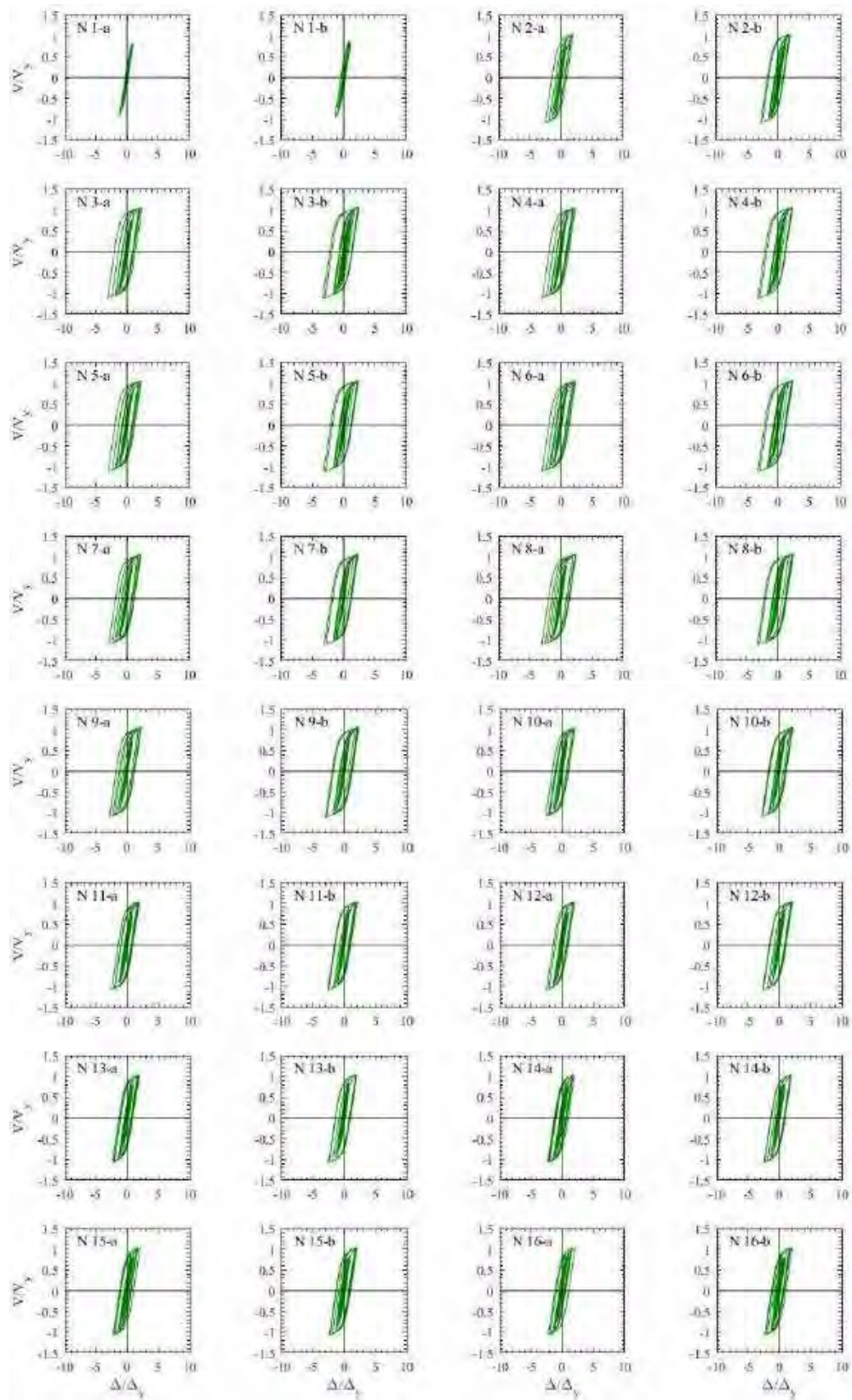


Figura H.142. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración MI15-B (2017)



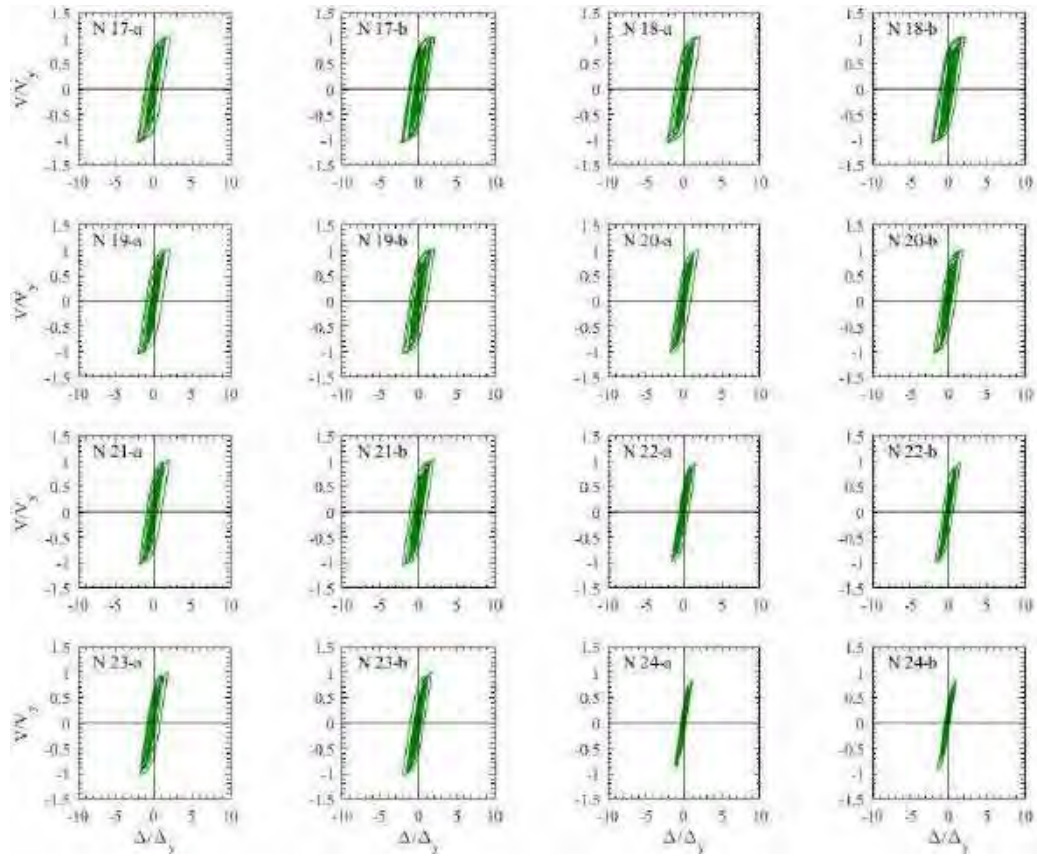
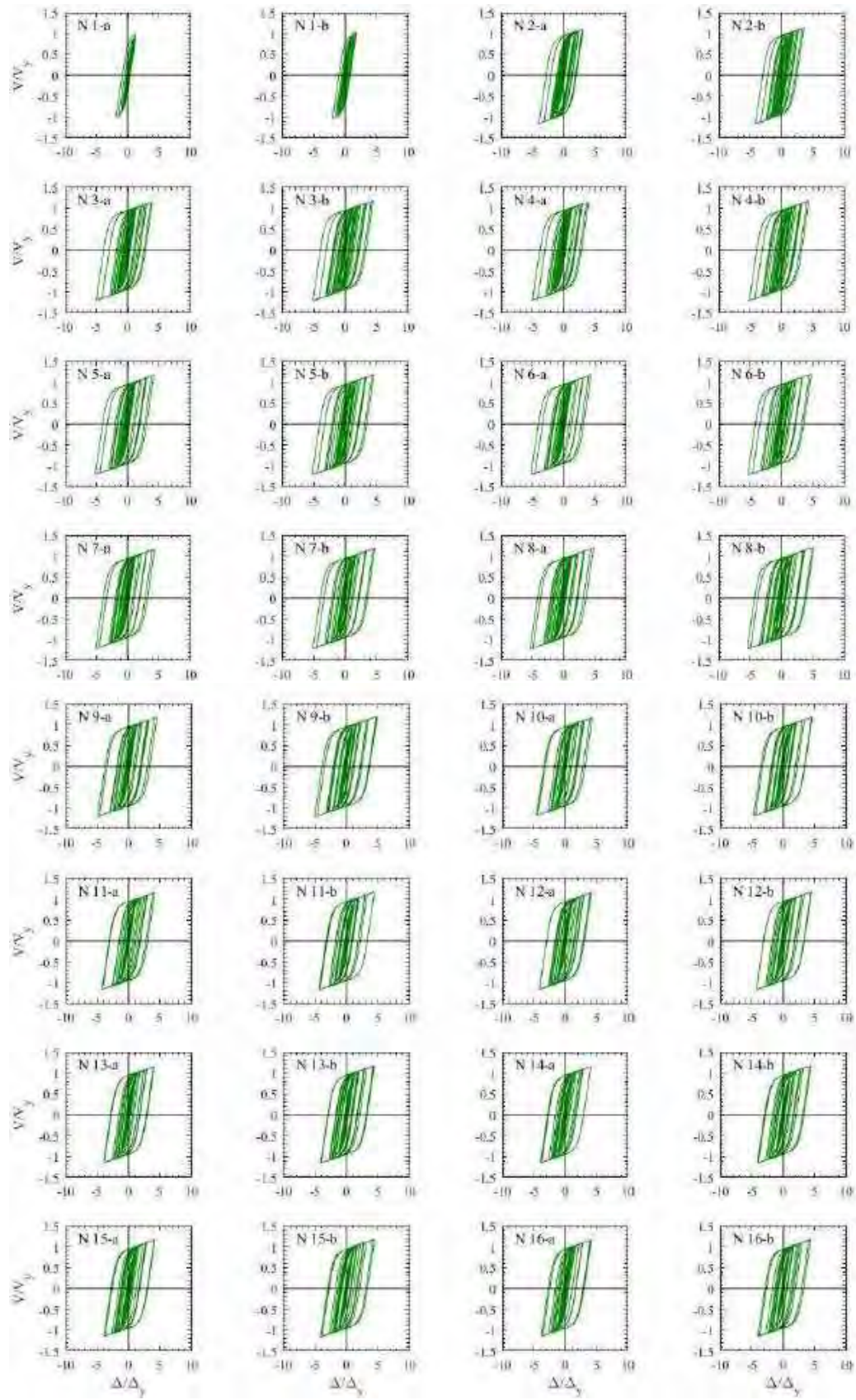


Figura H.143. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración XO36-A (2017)



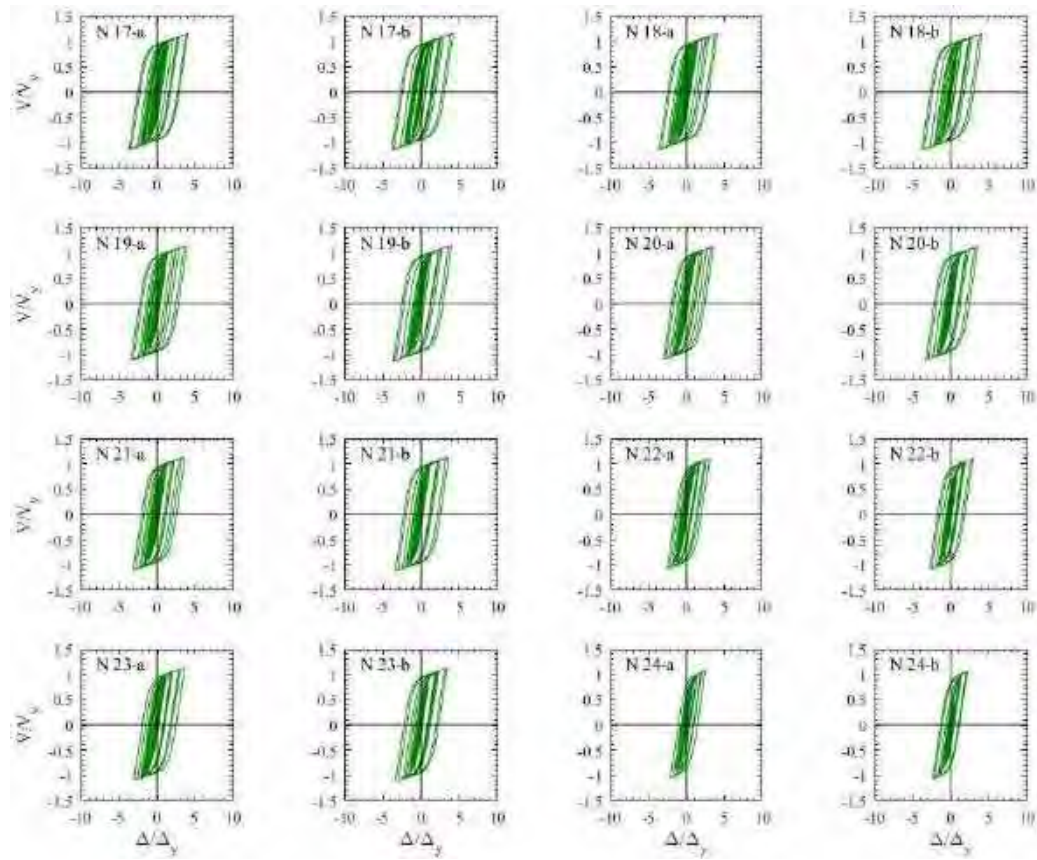
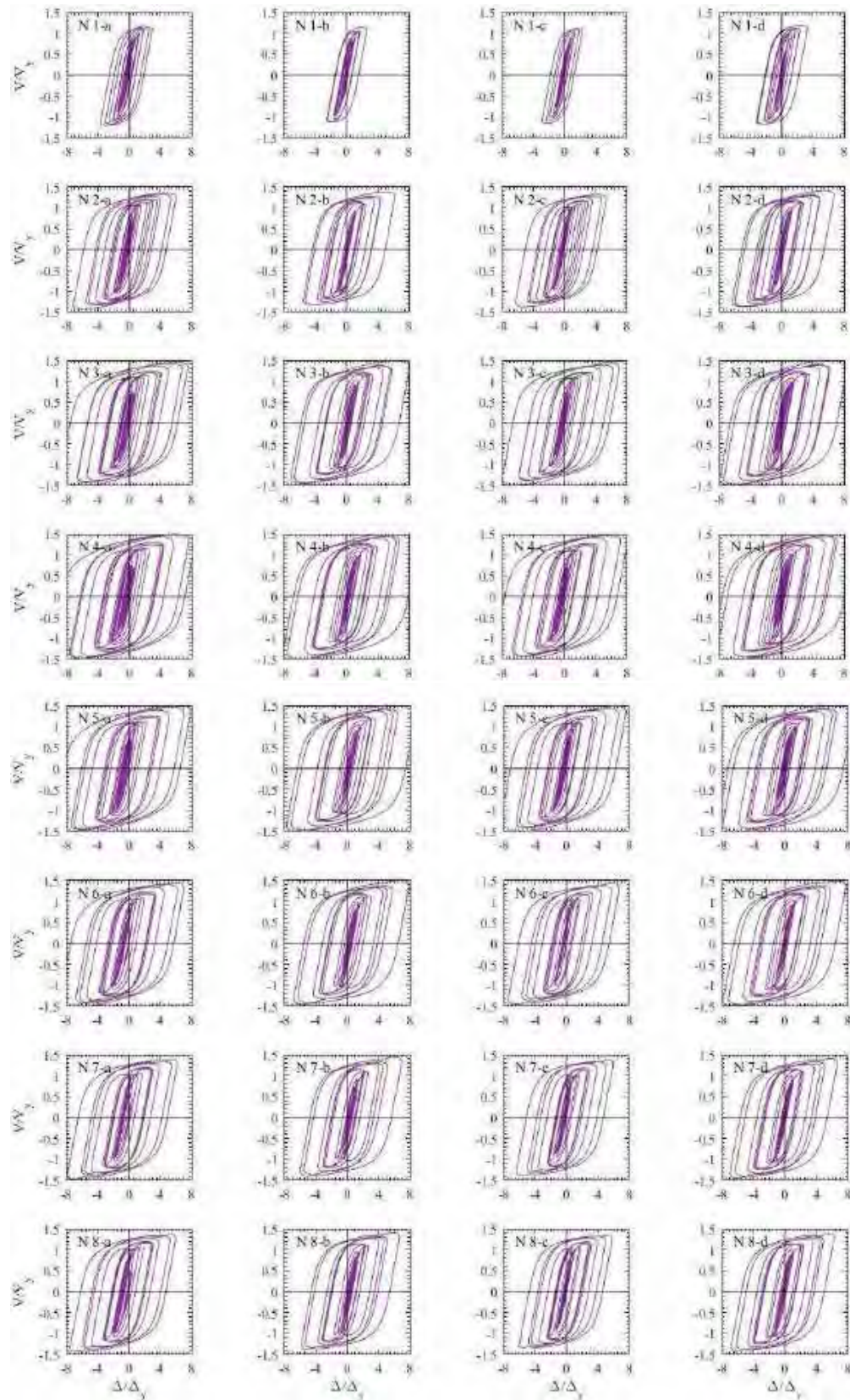
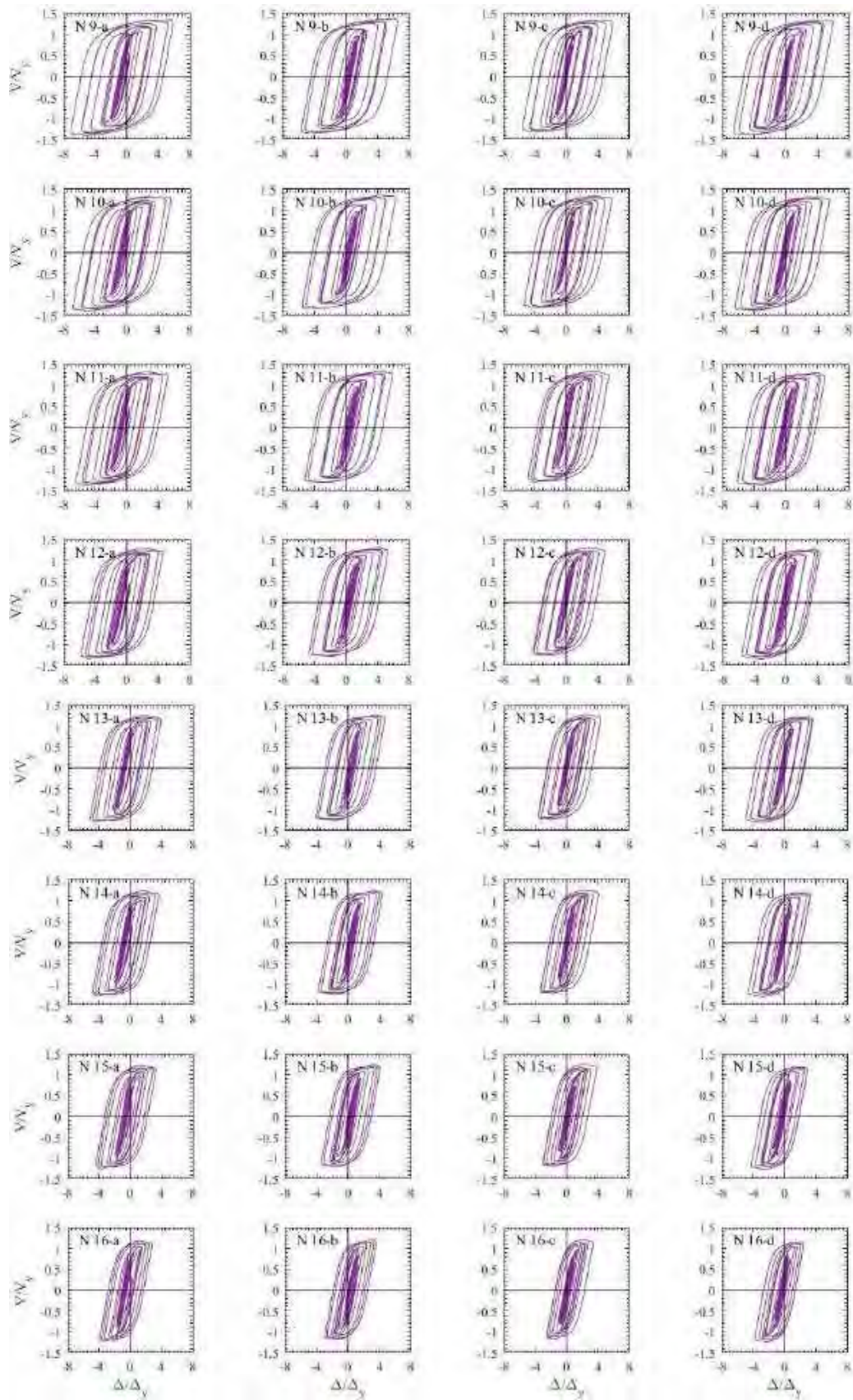


Figura H.144. Ciclos de histéresis de dispositivos ADAS, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.2.2 Ciclos de histéresis de dispositivos BRB





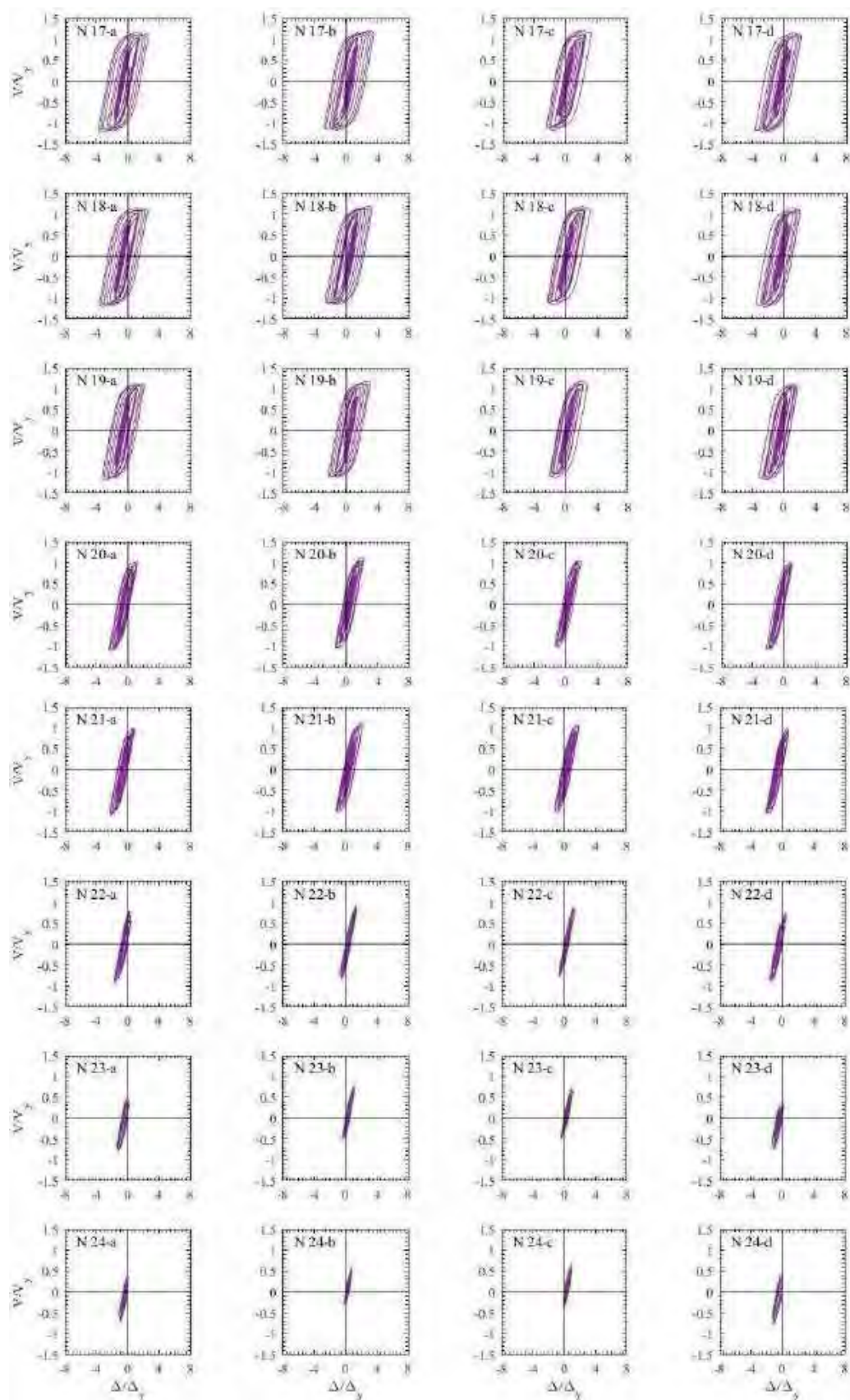
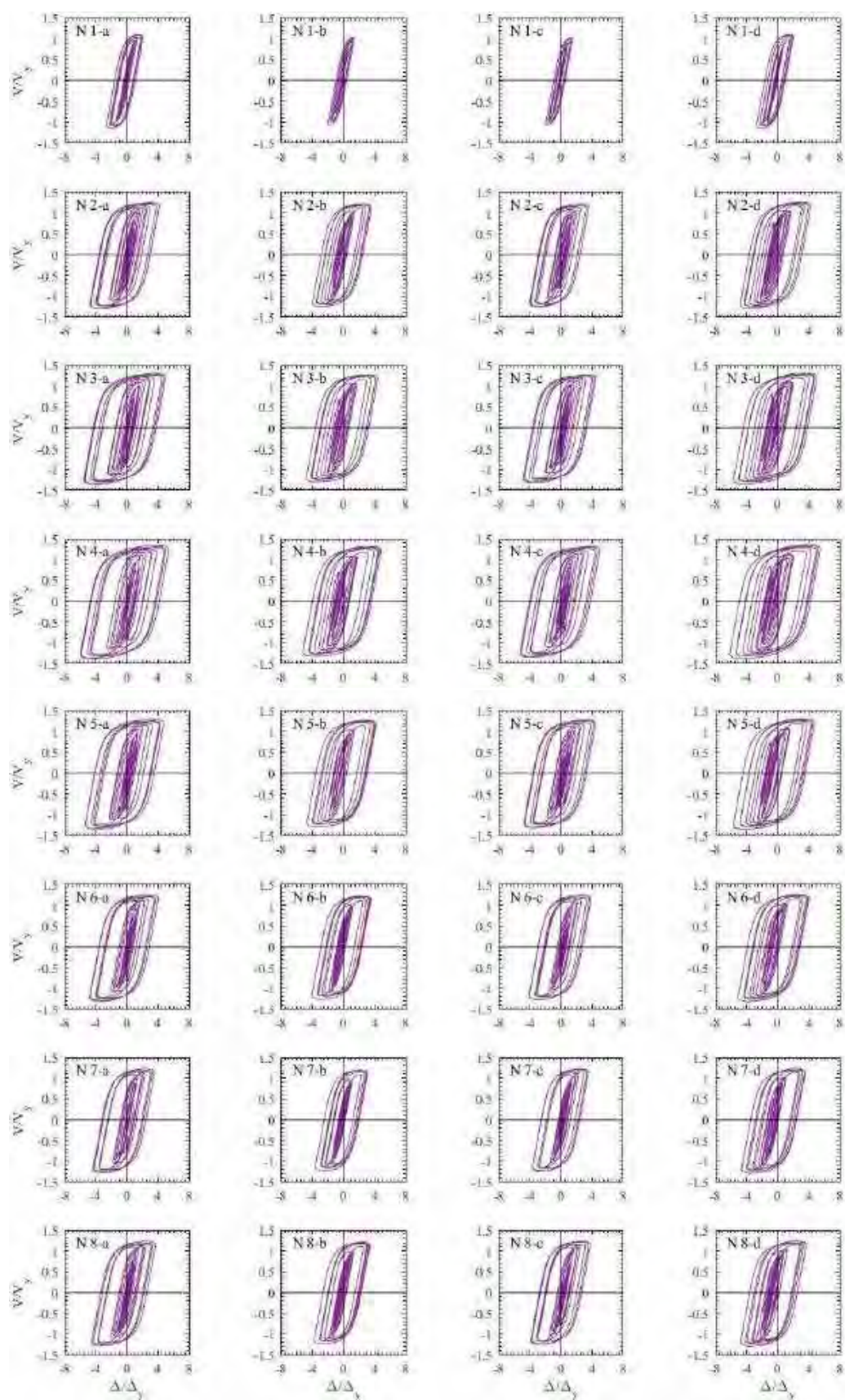
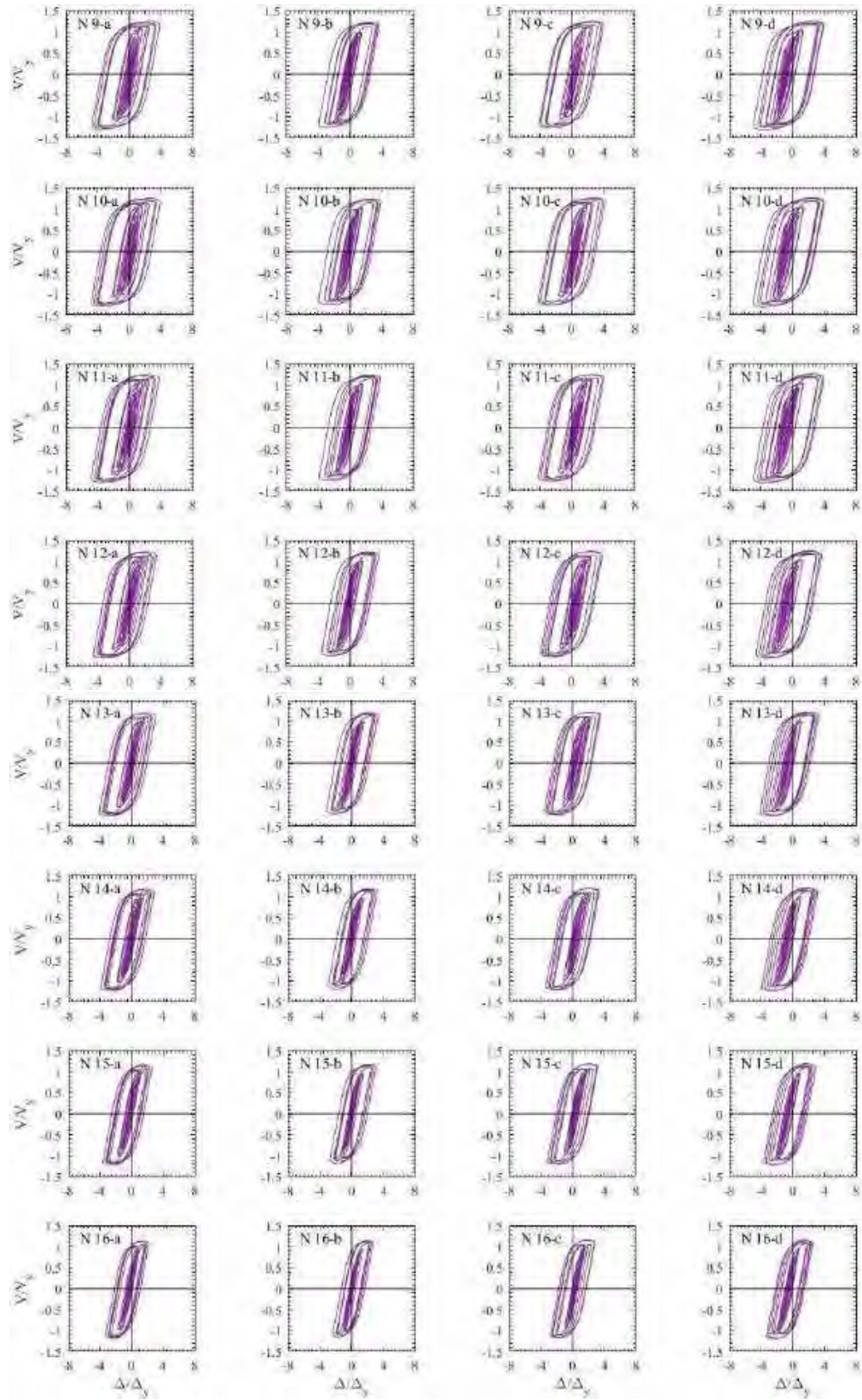


Figura H.145. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración TL08-A





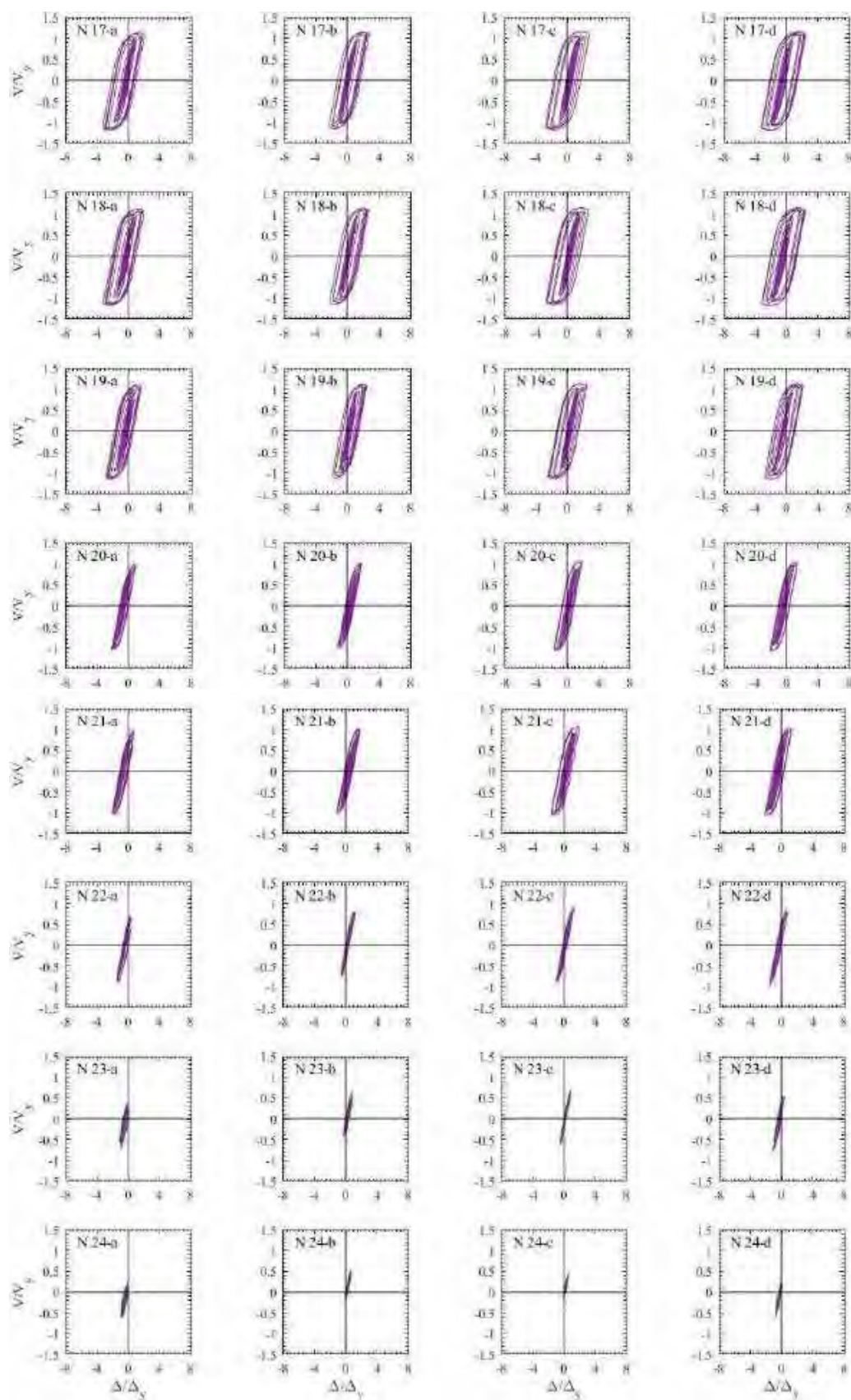
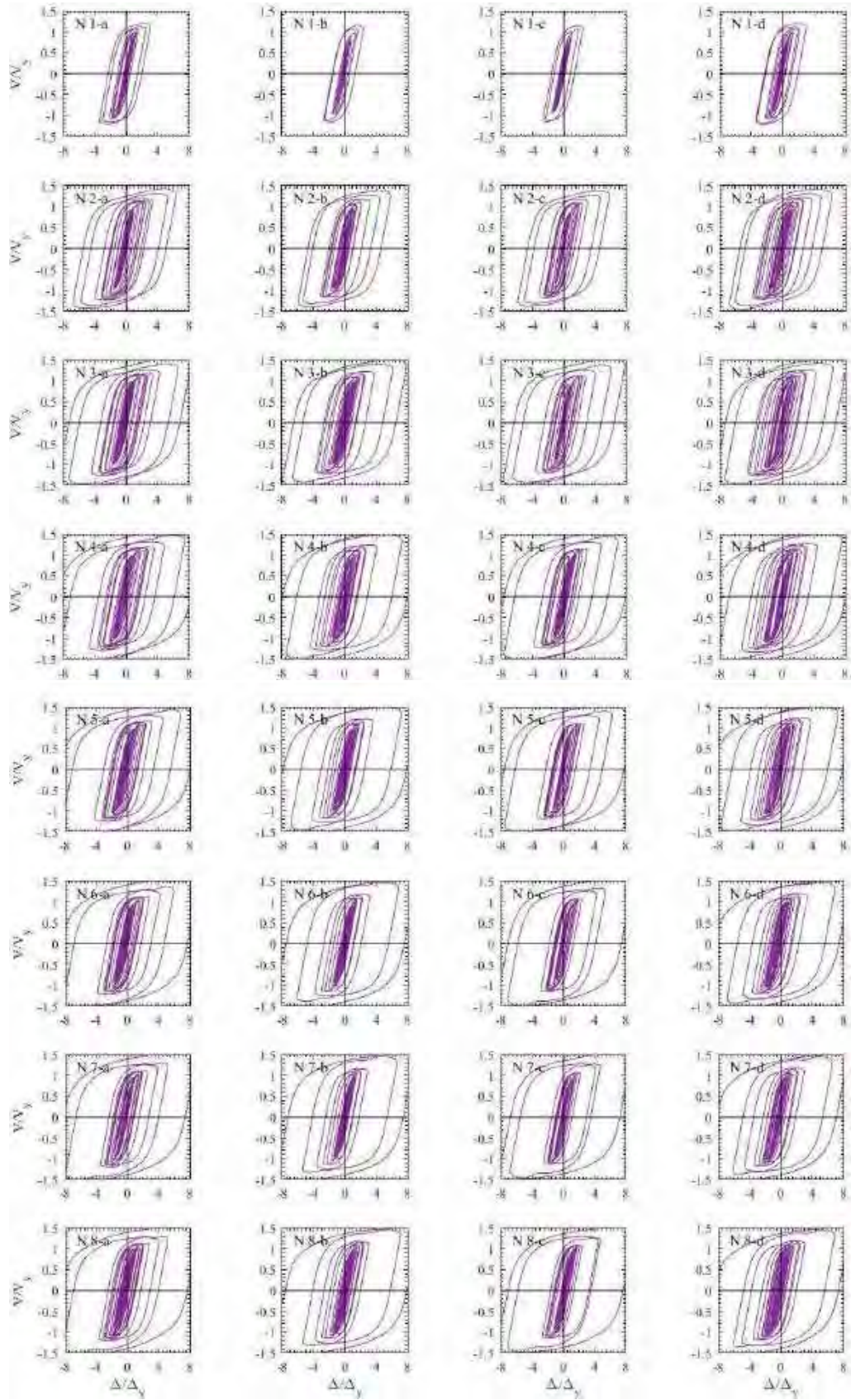
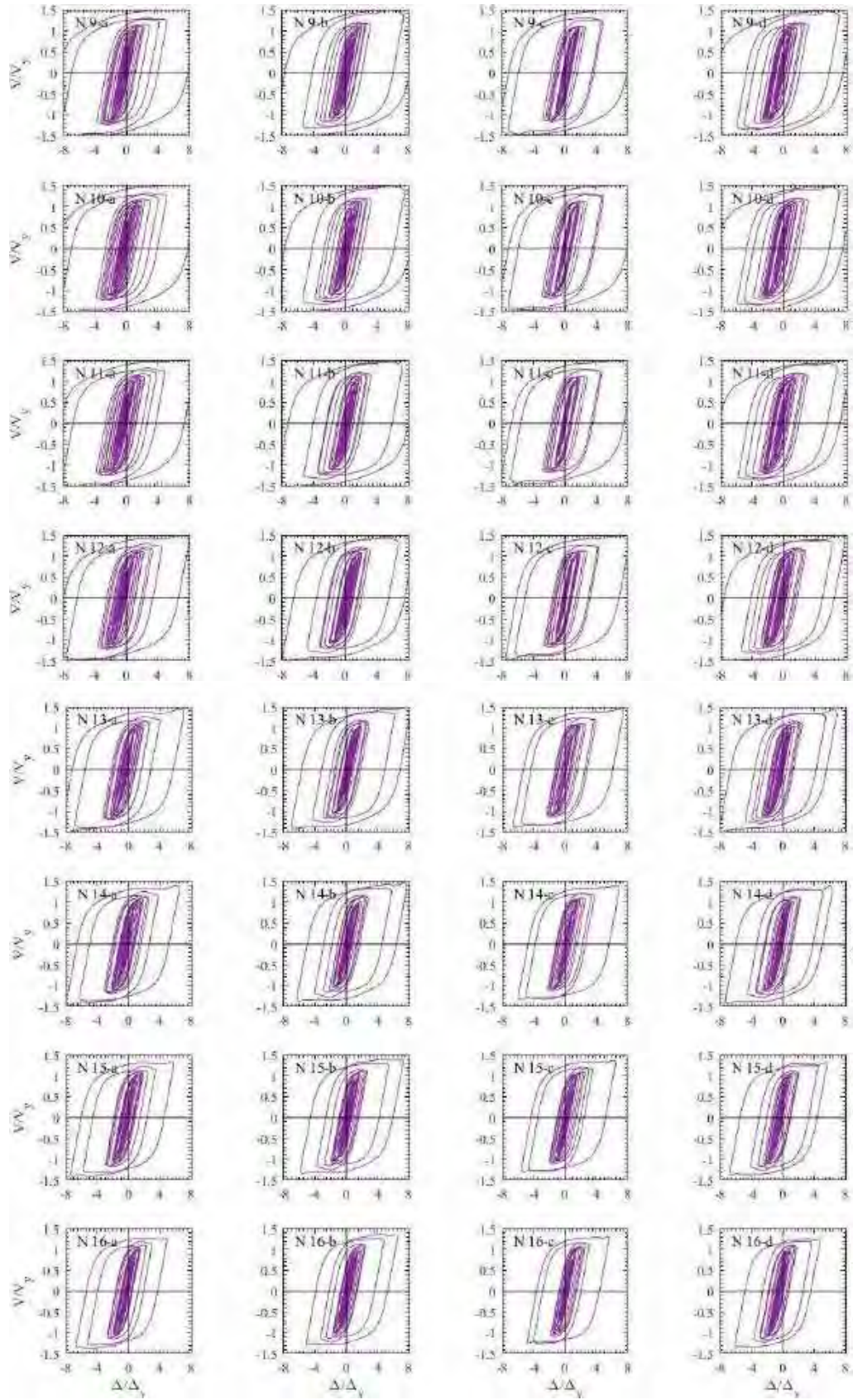


Figura H.146. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración TL08-B





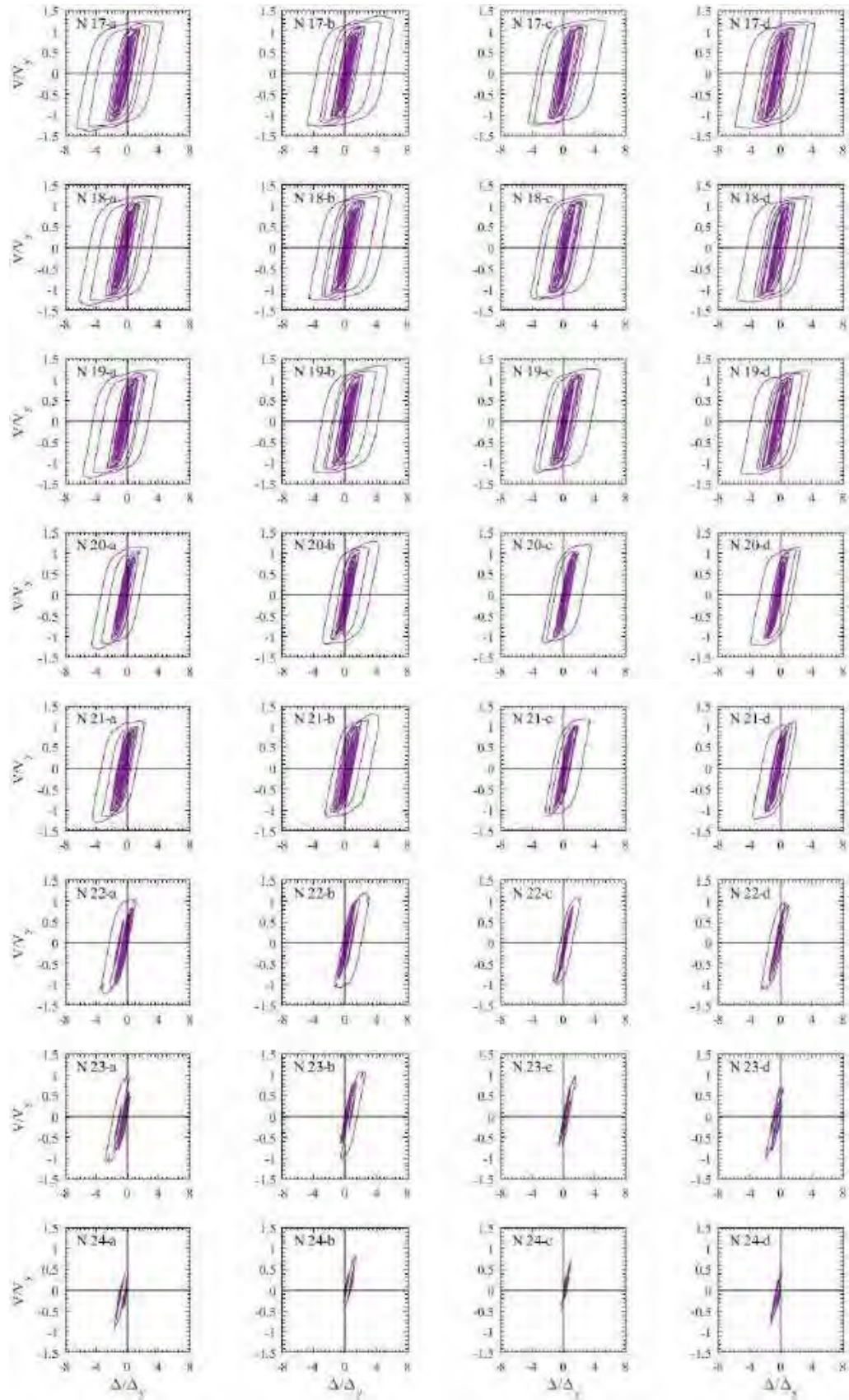
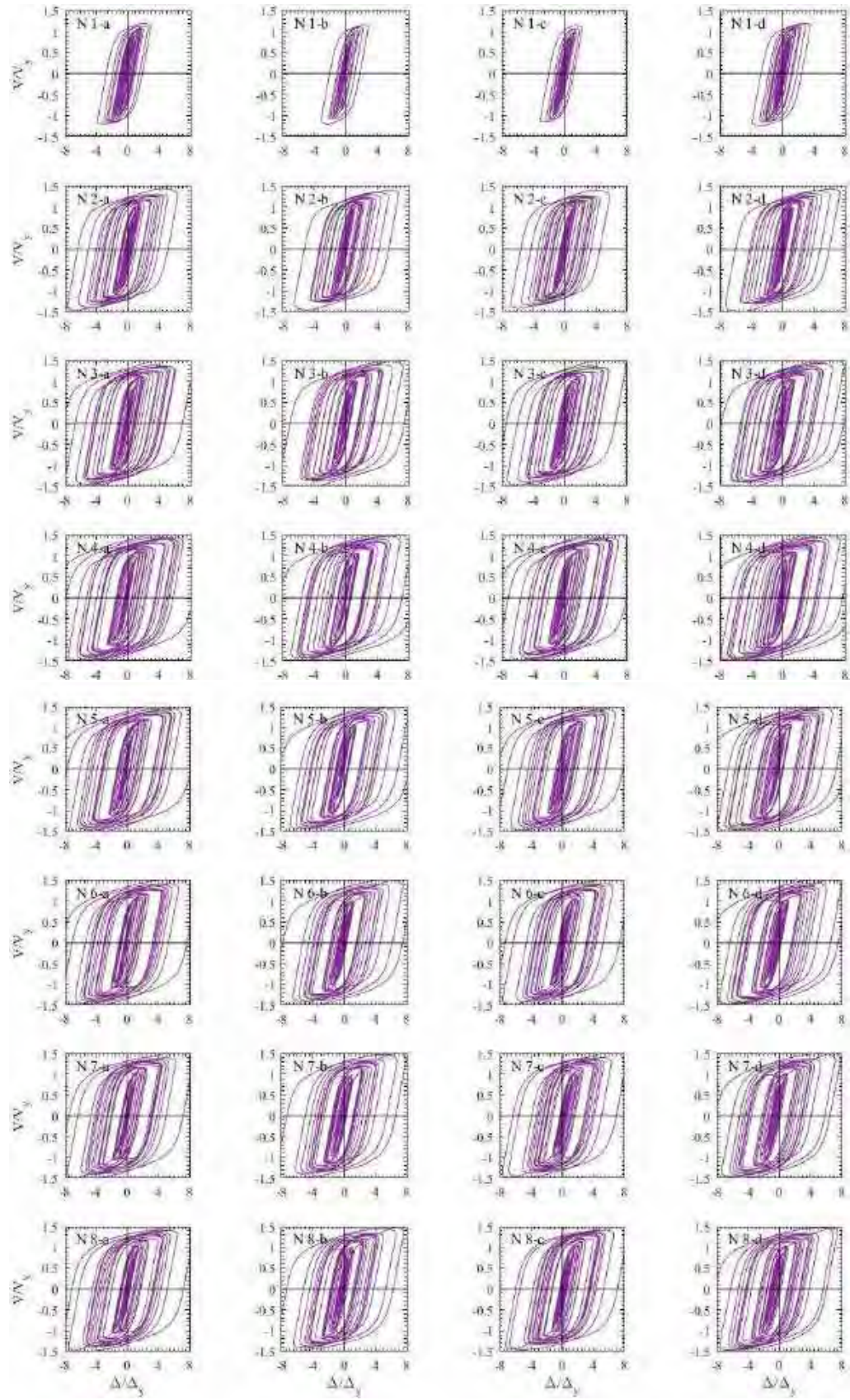
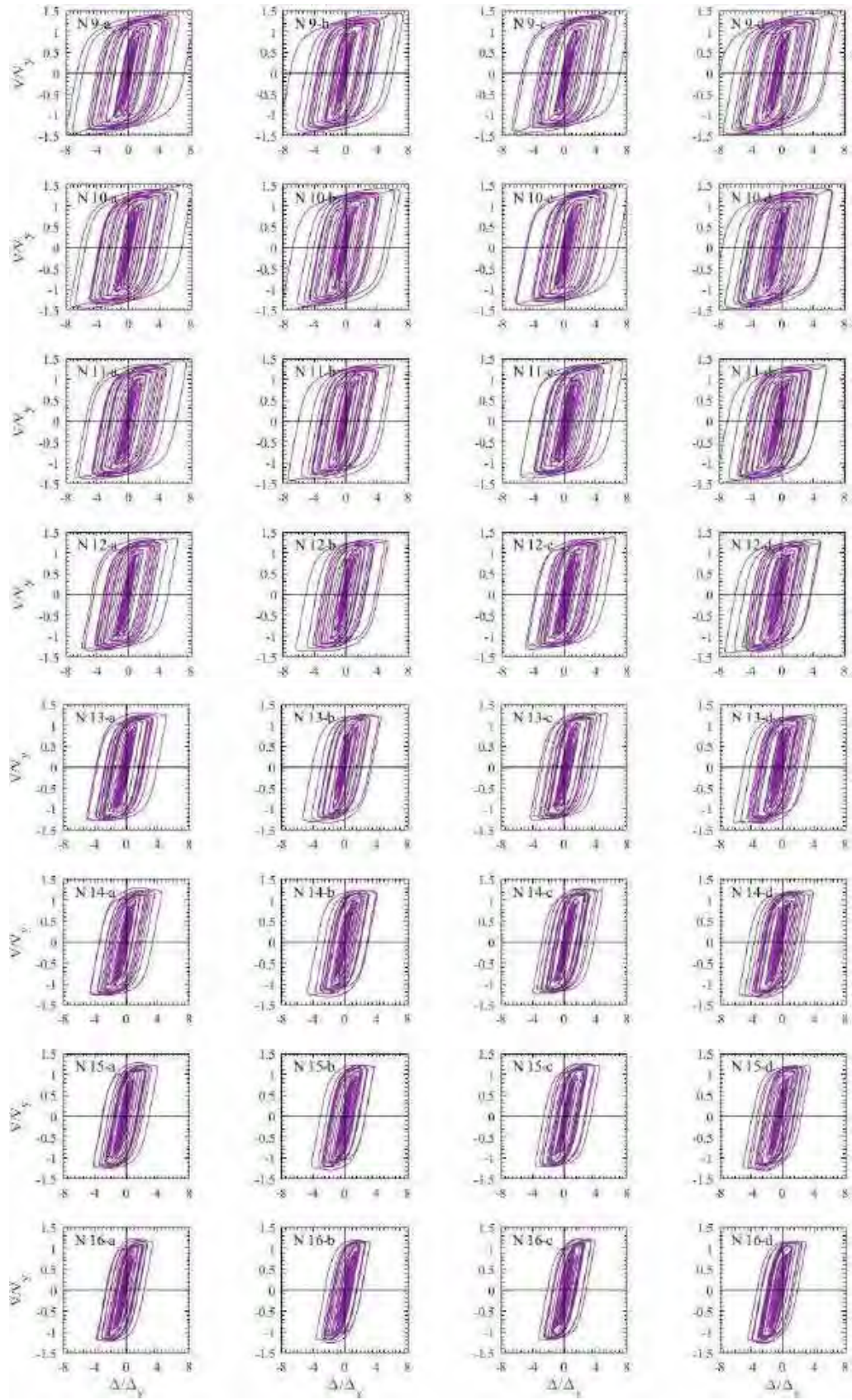


Figura H.147. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CJ03-A





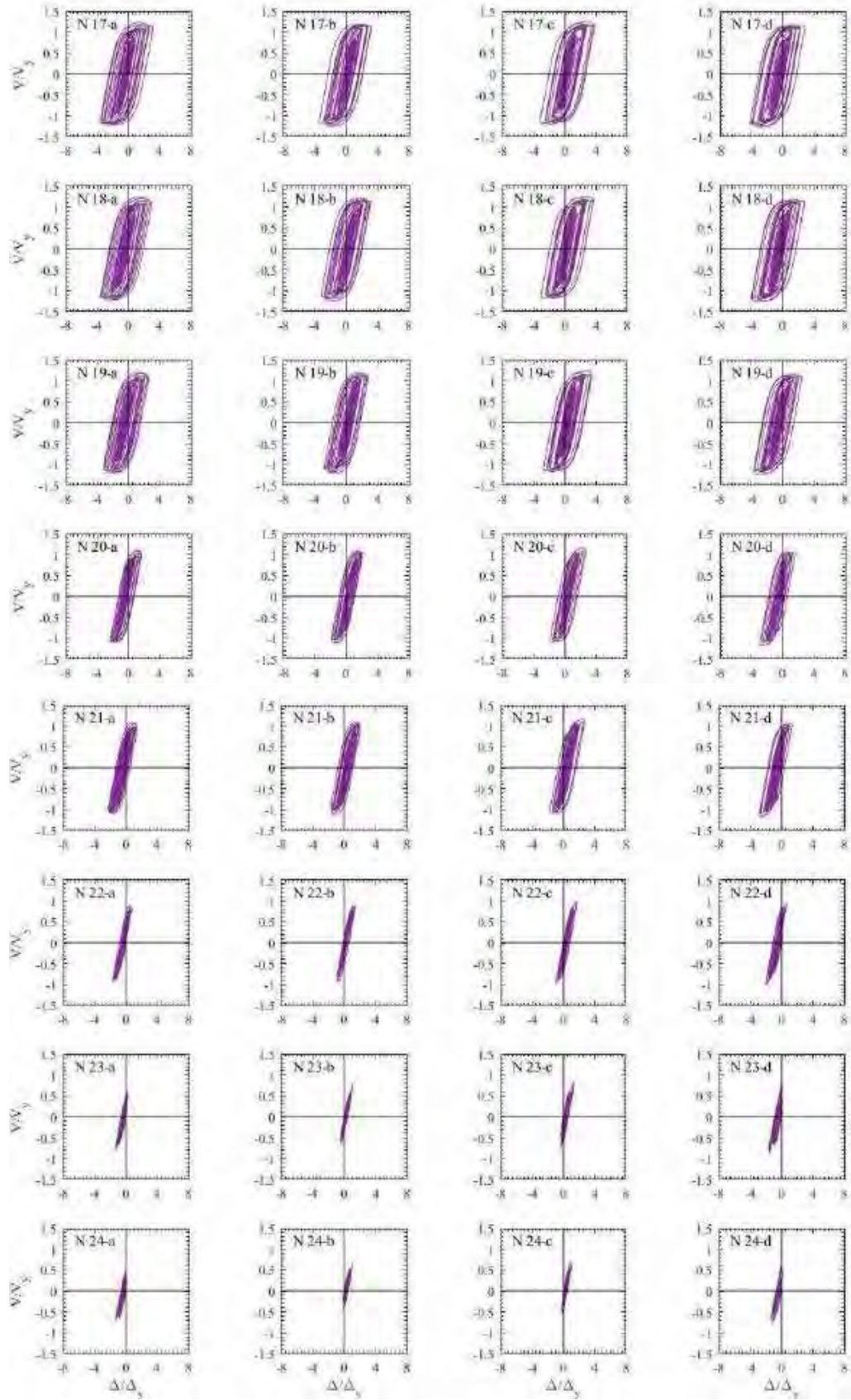
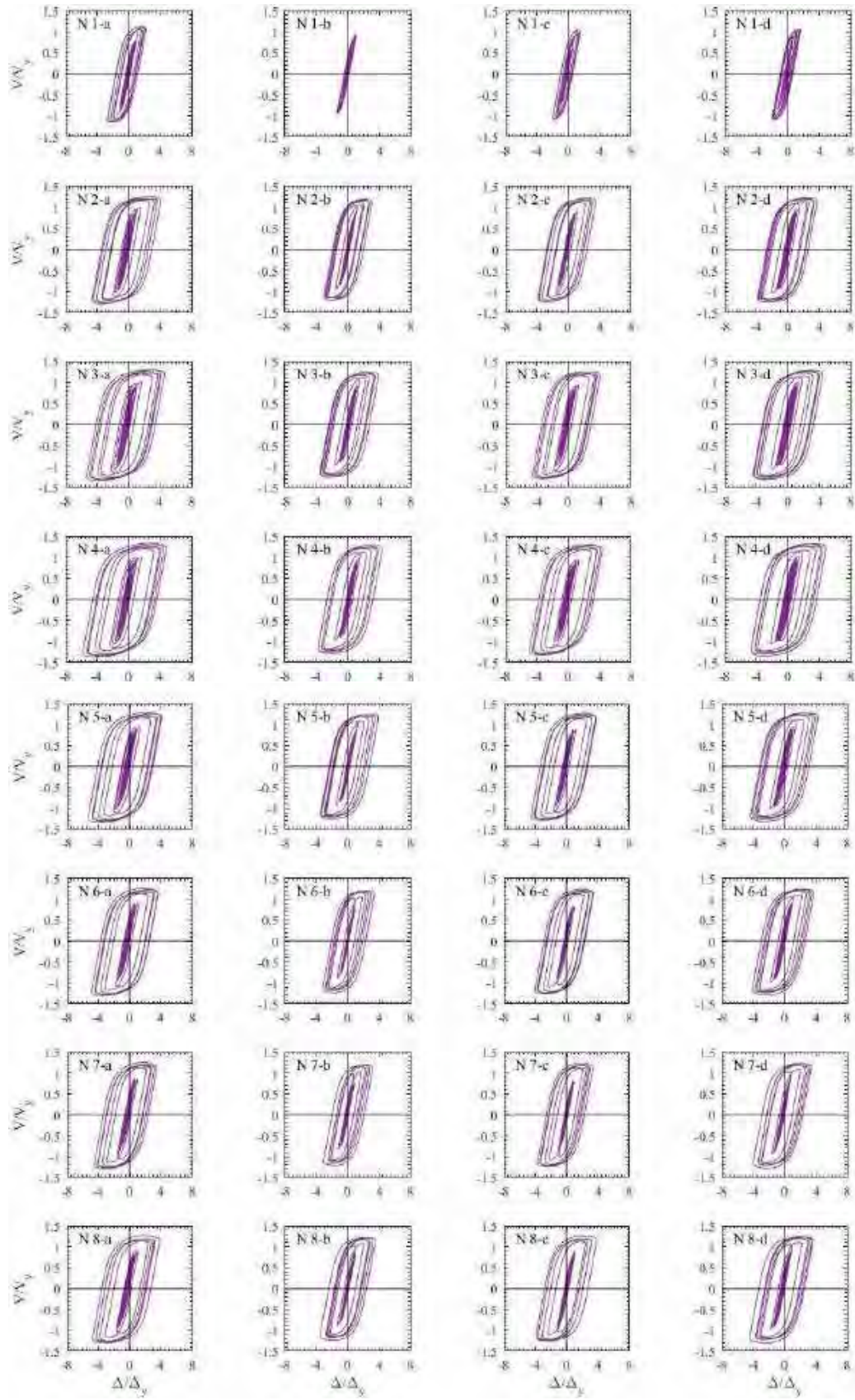
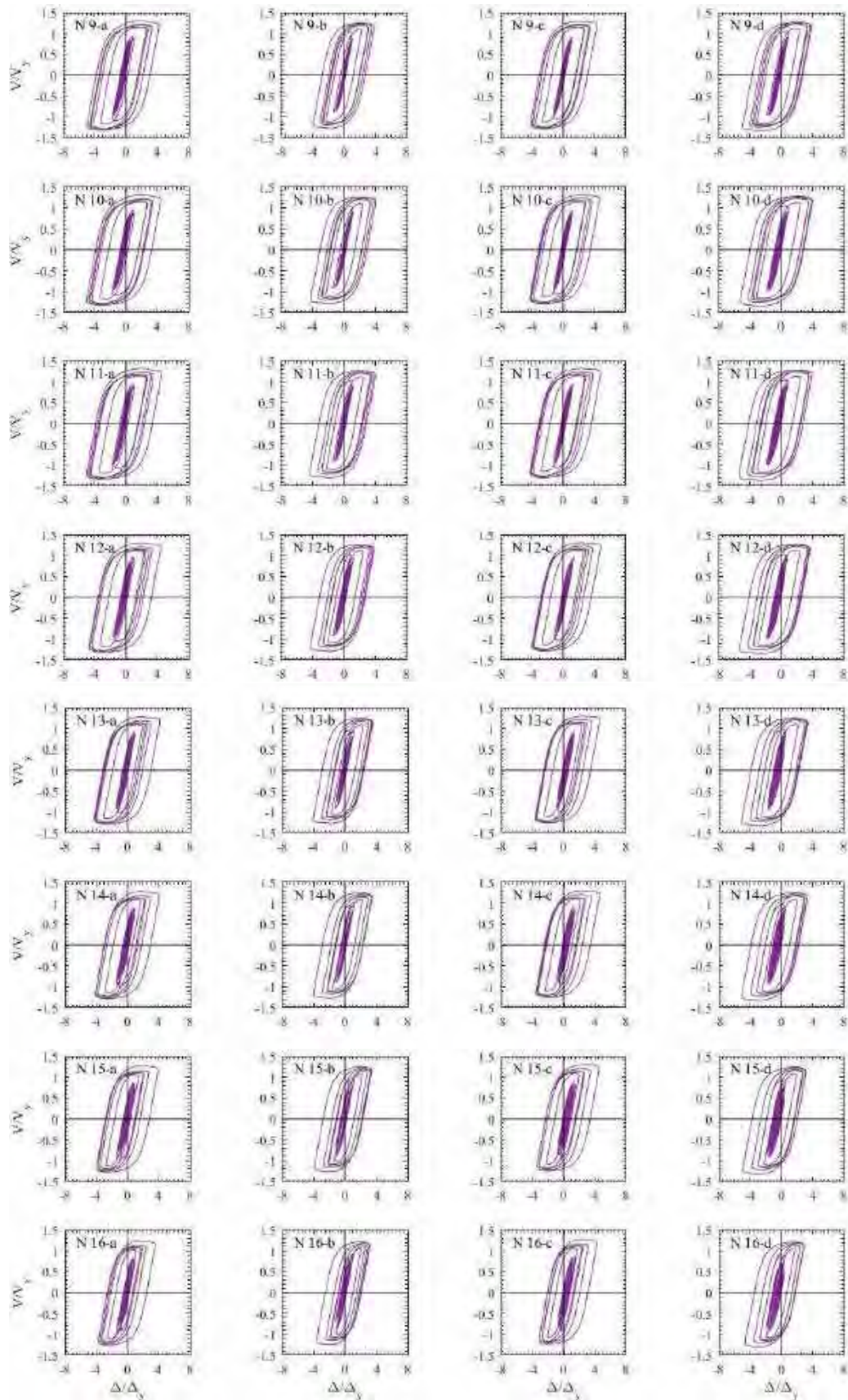


Figura H.148. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CJ03-B





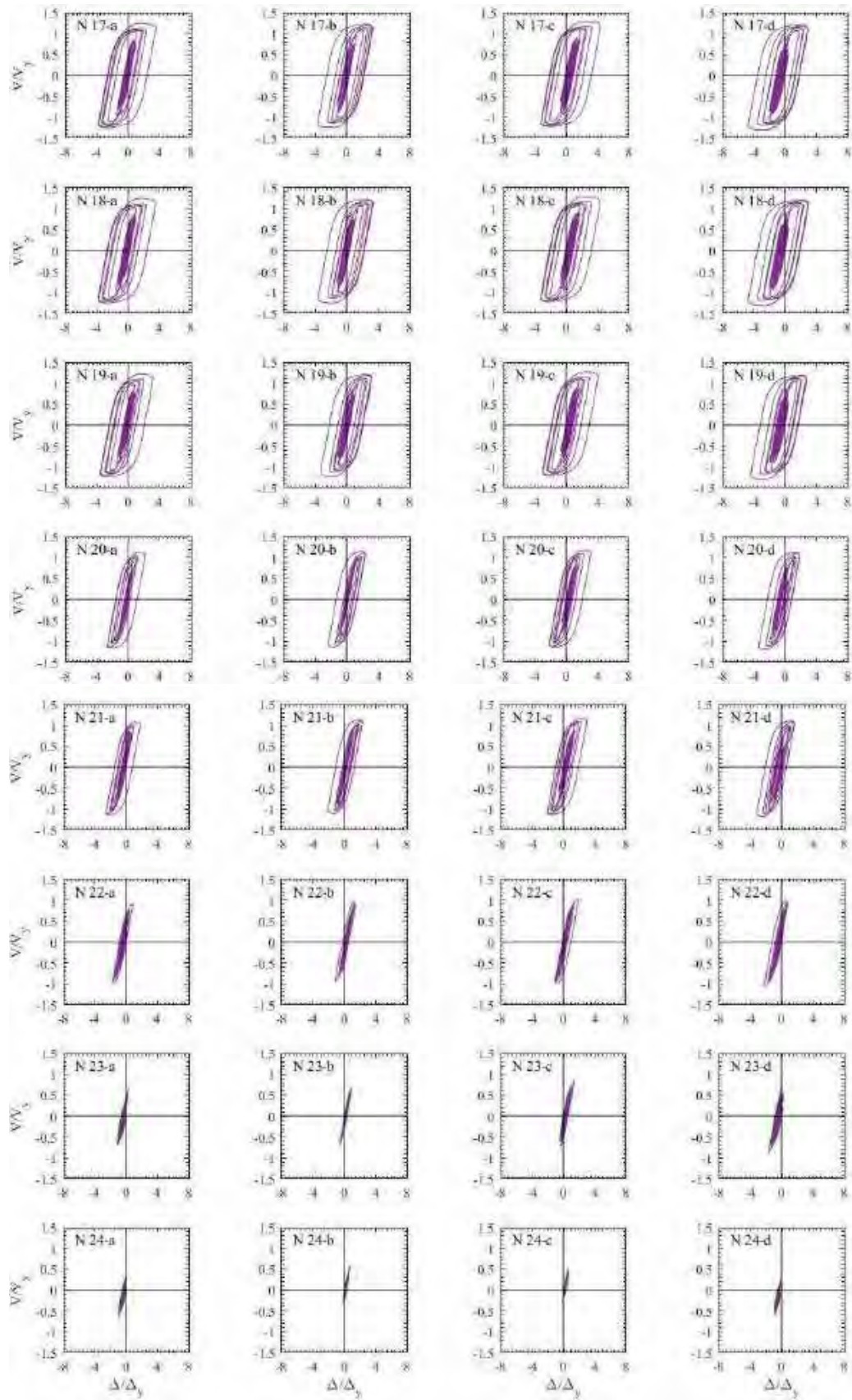
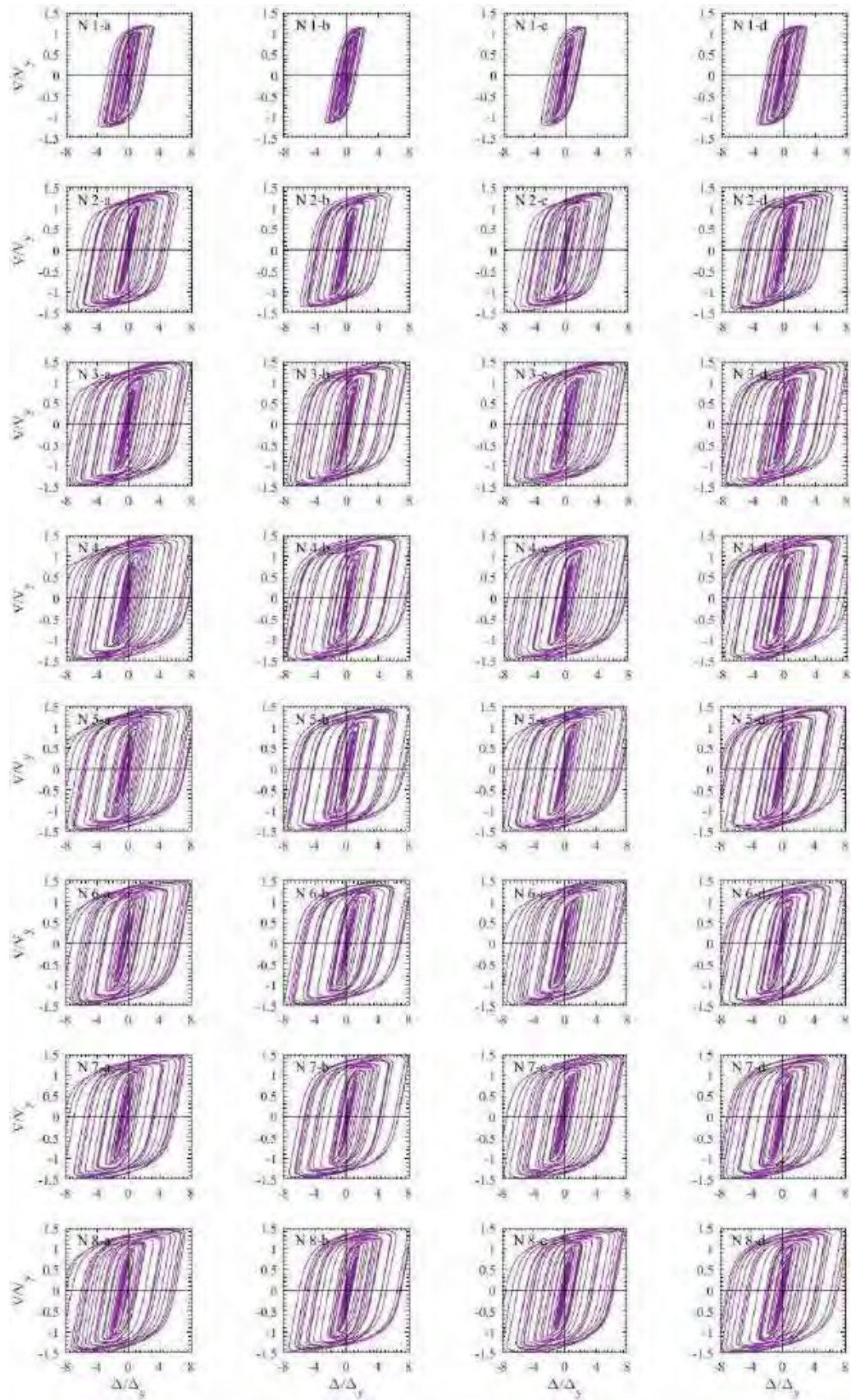
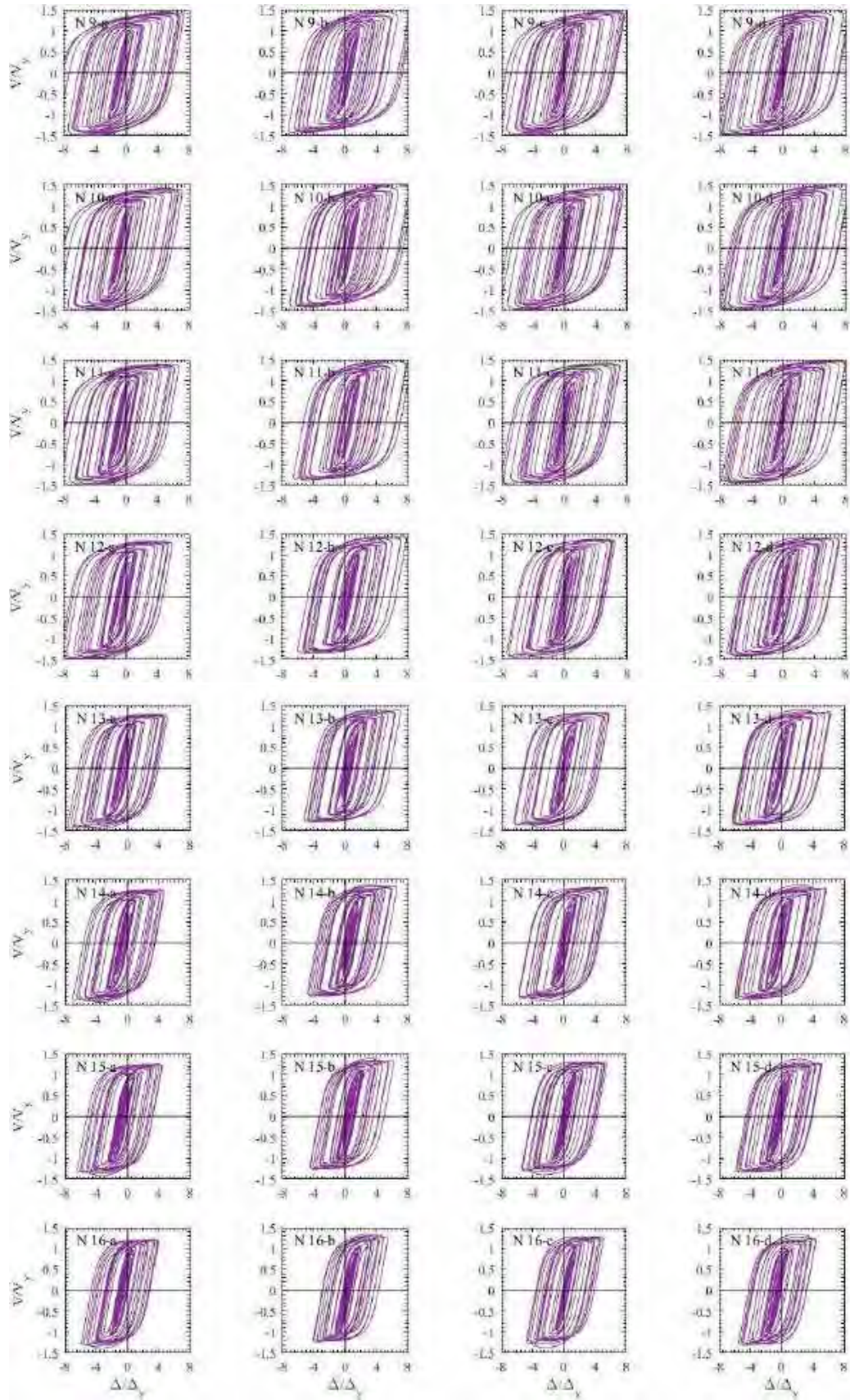


Figura H.149. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración ALAM85-A





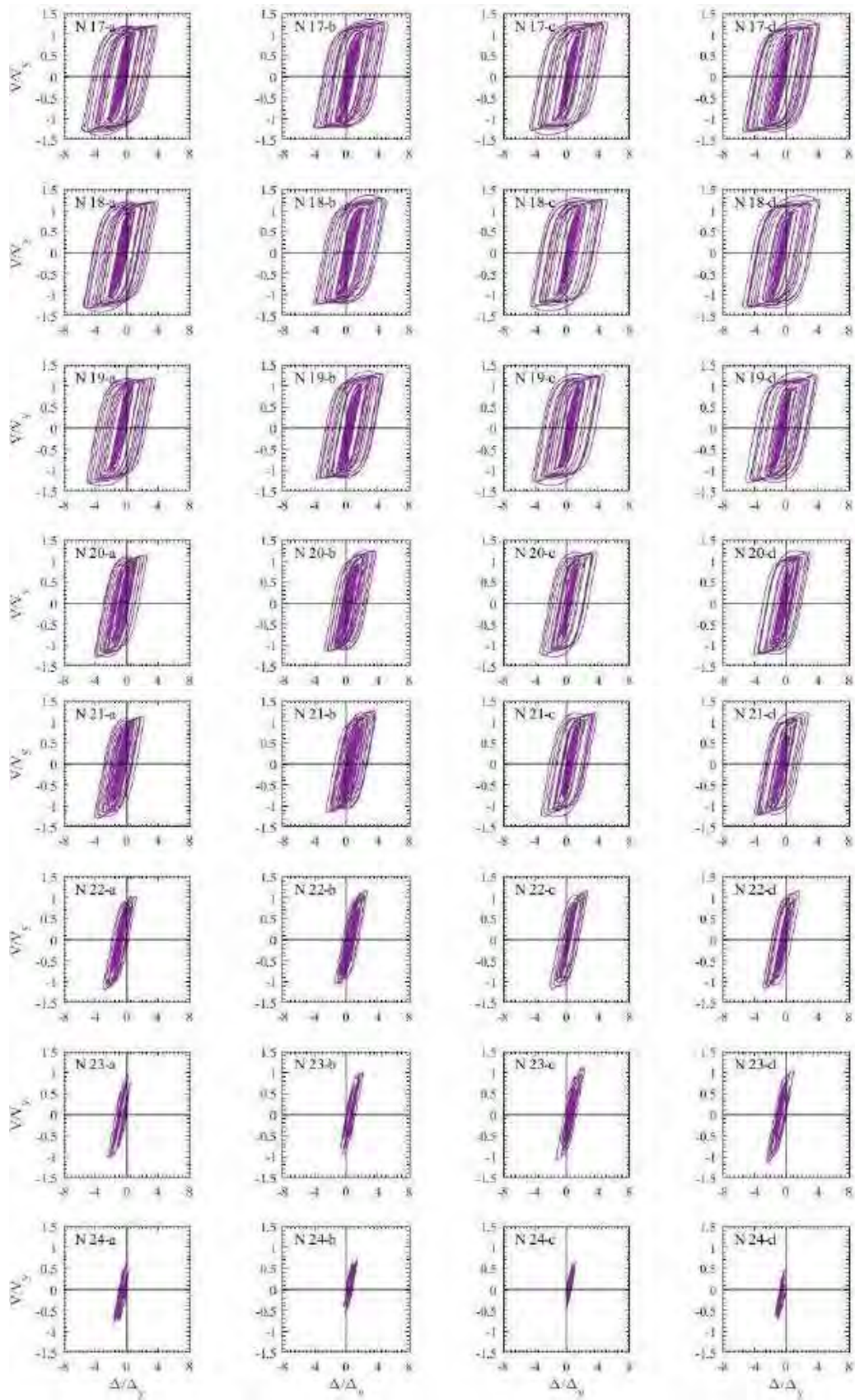
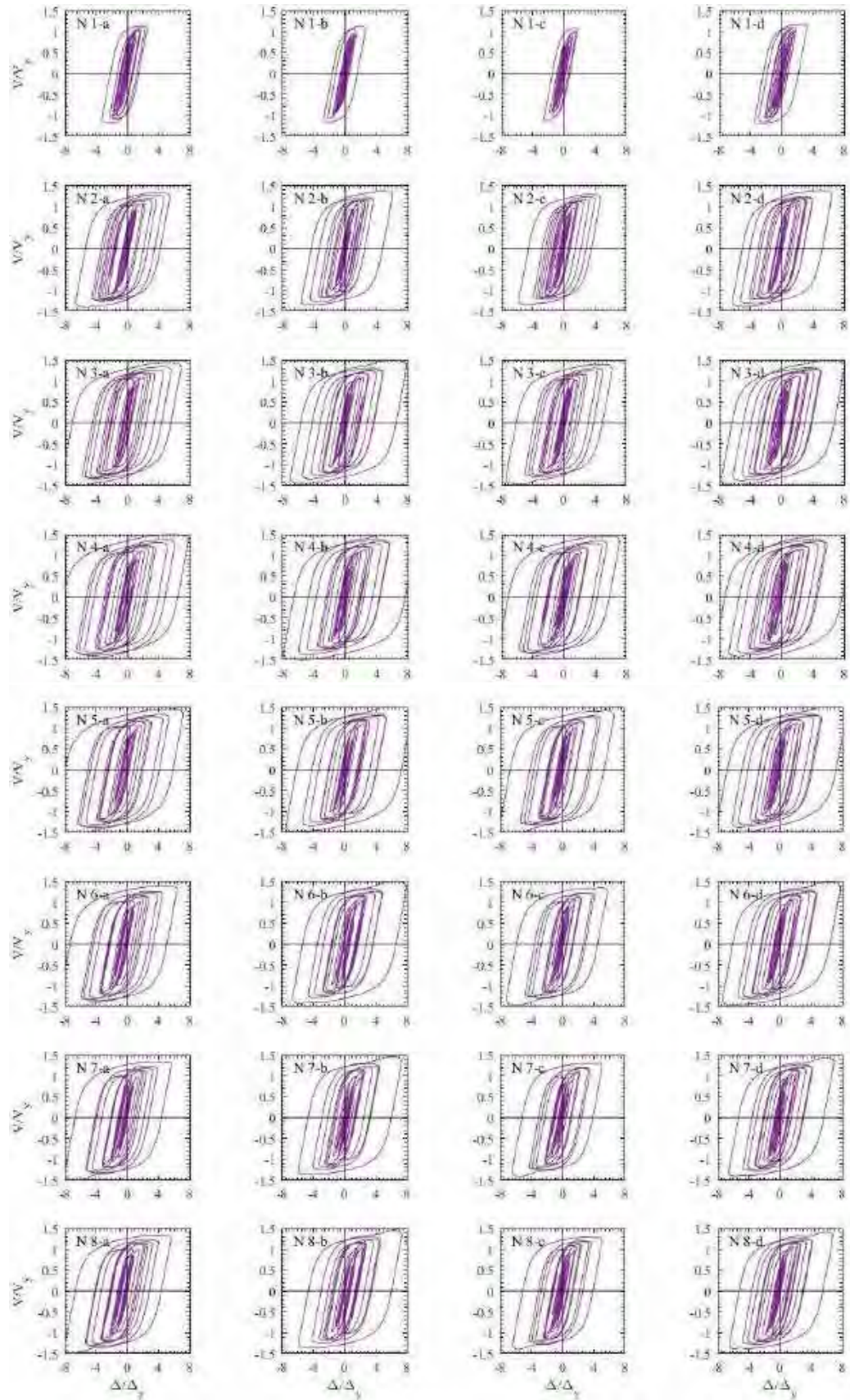
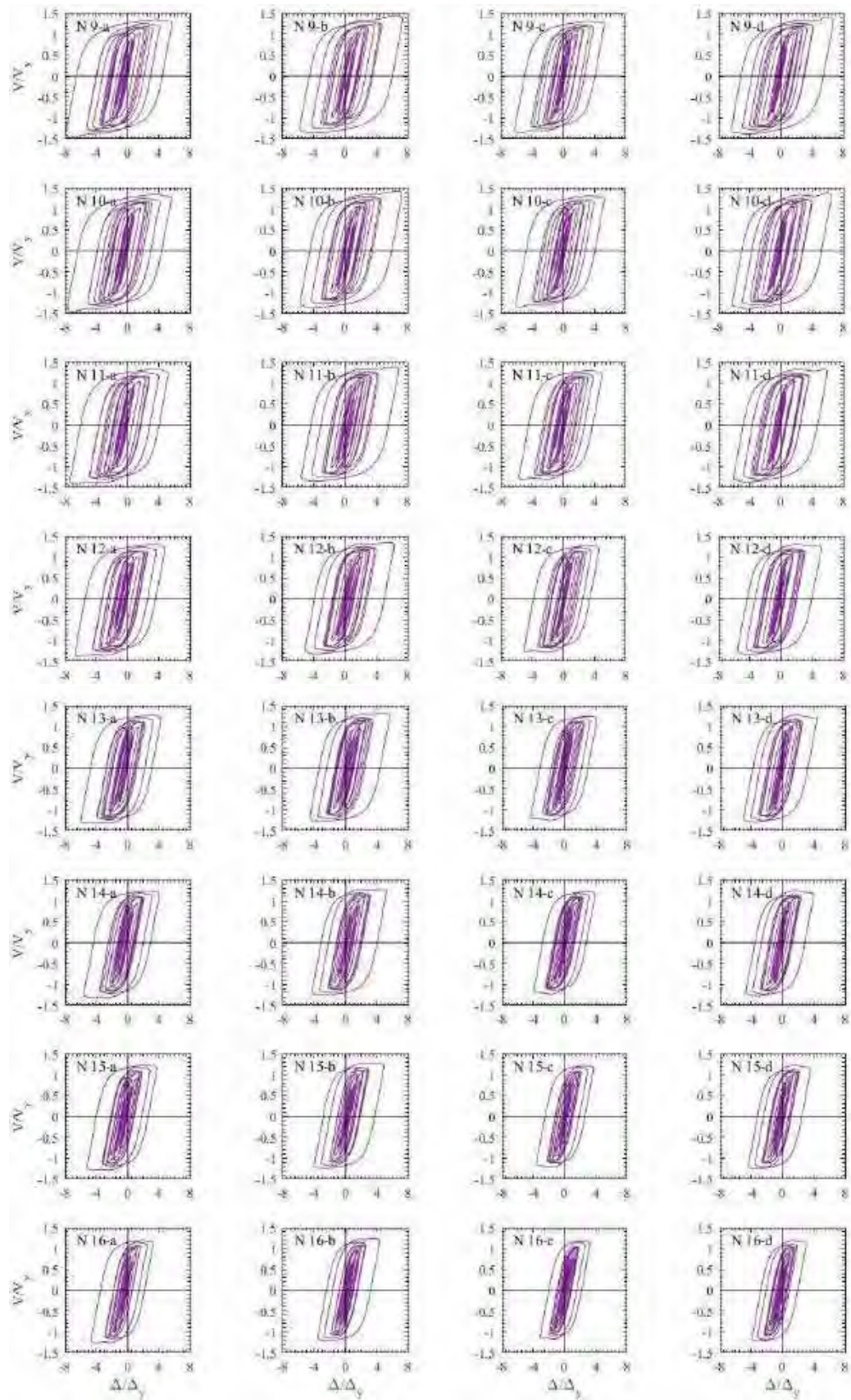


Figura H.150. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración ALAM85-B





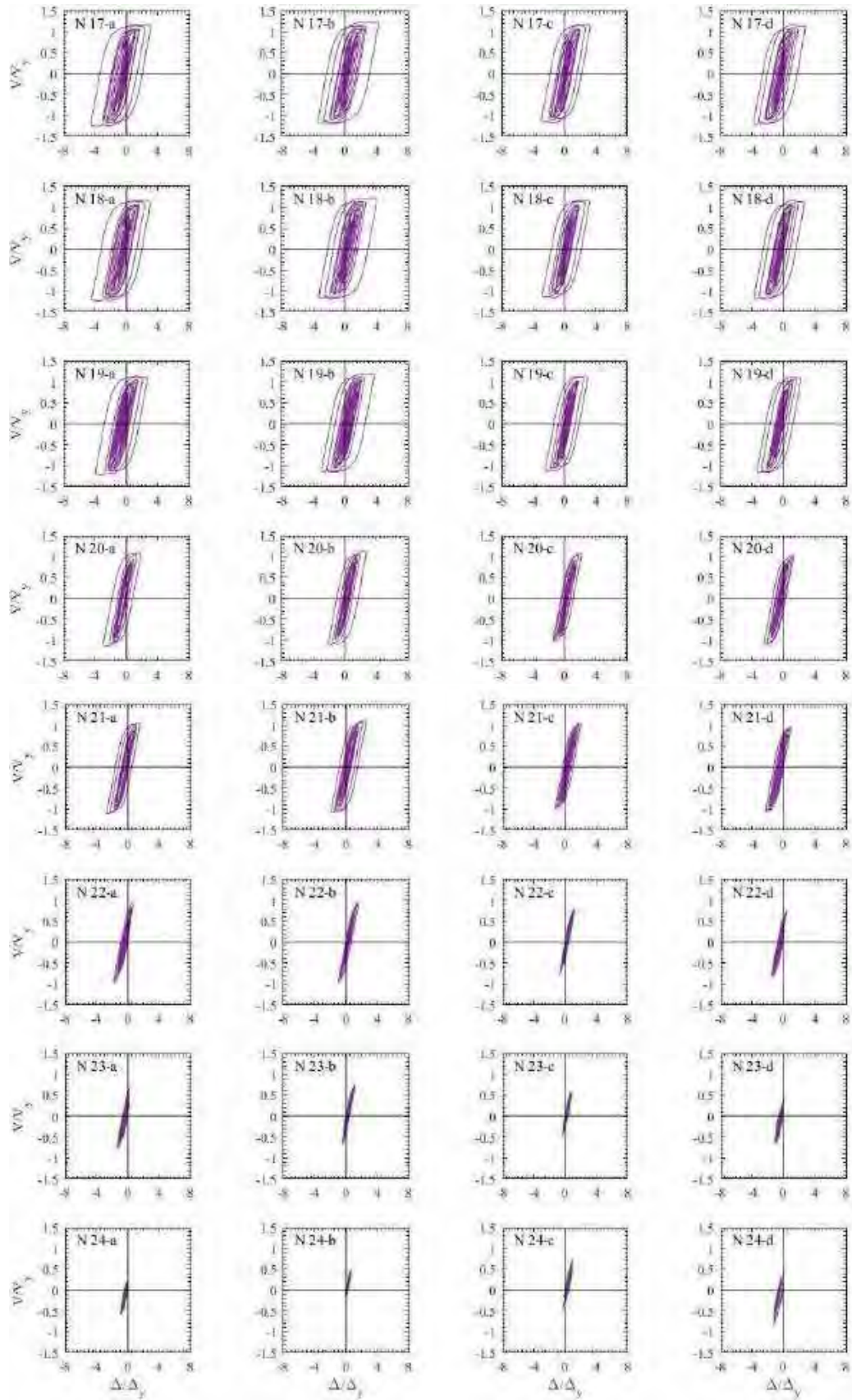
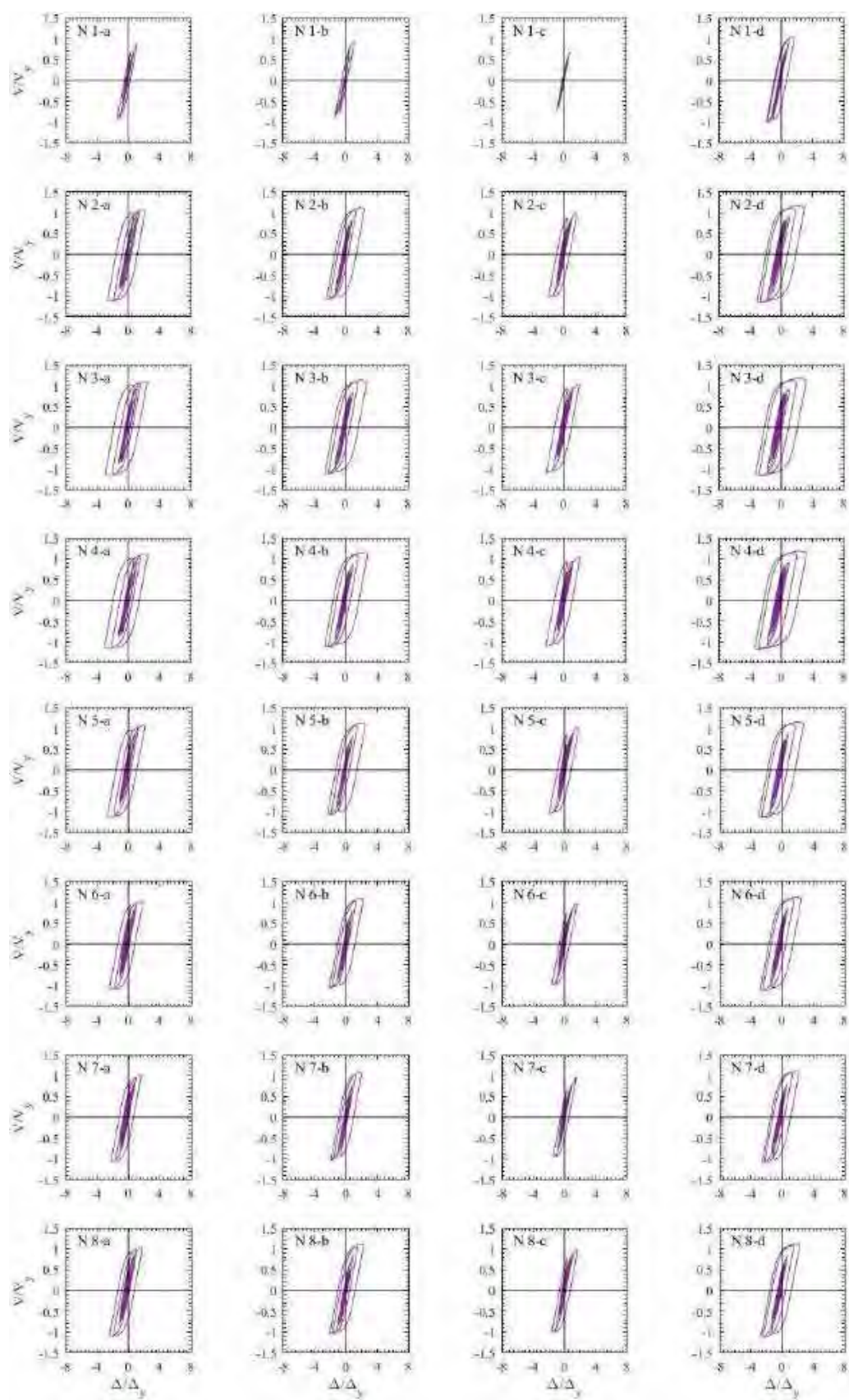
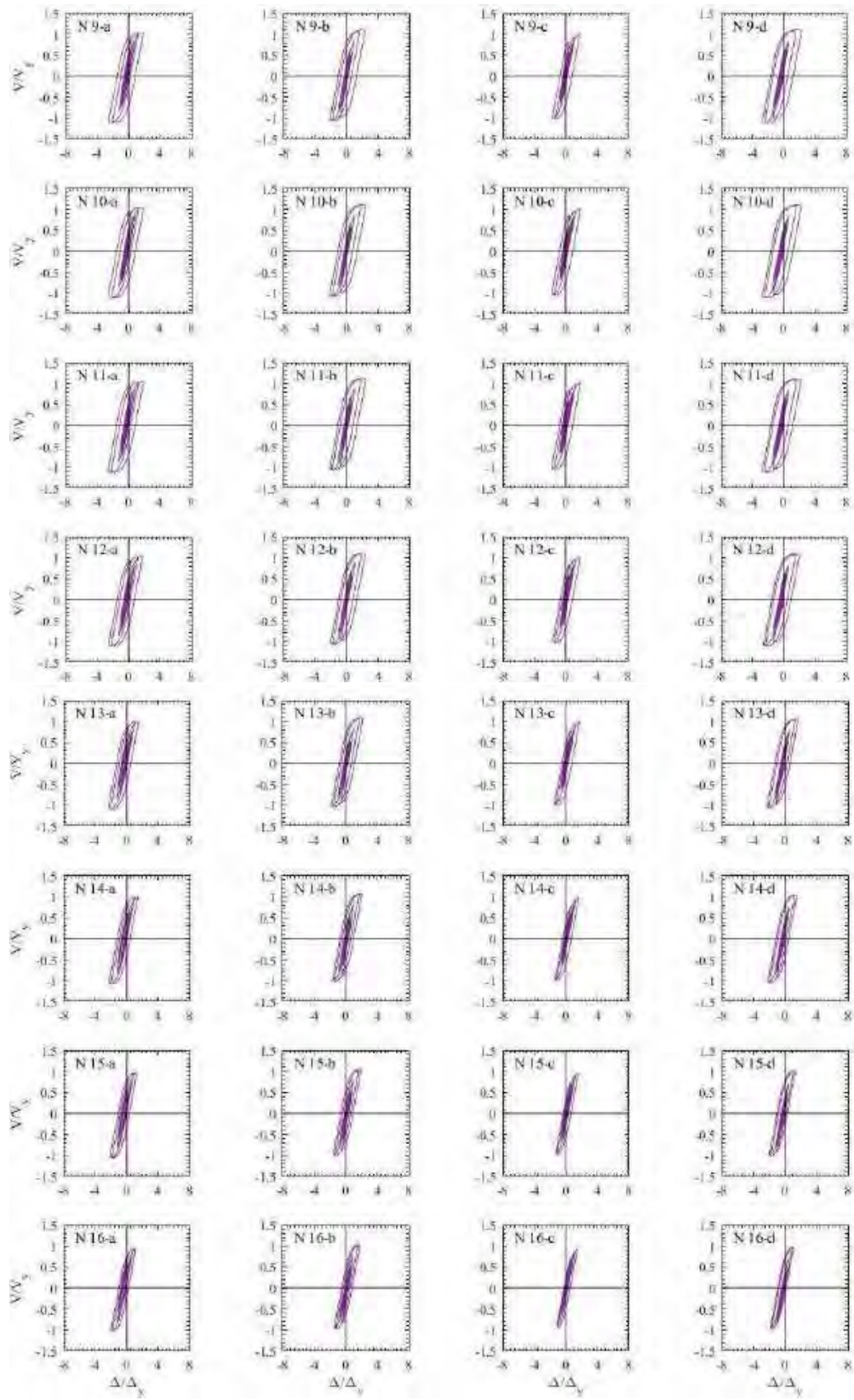


Figura H.151. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración TBOM-A (1985)





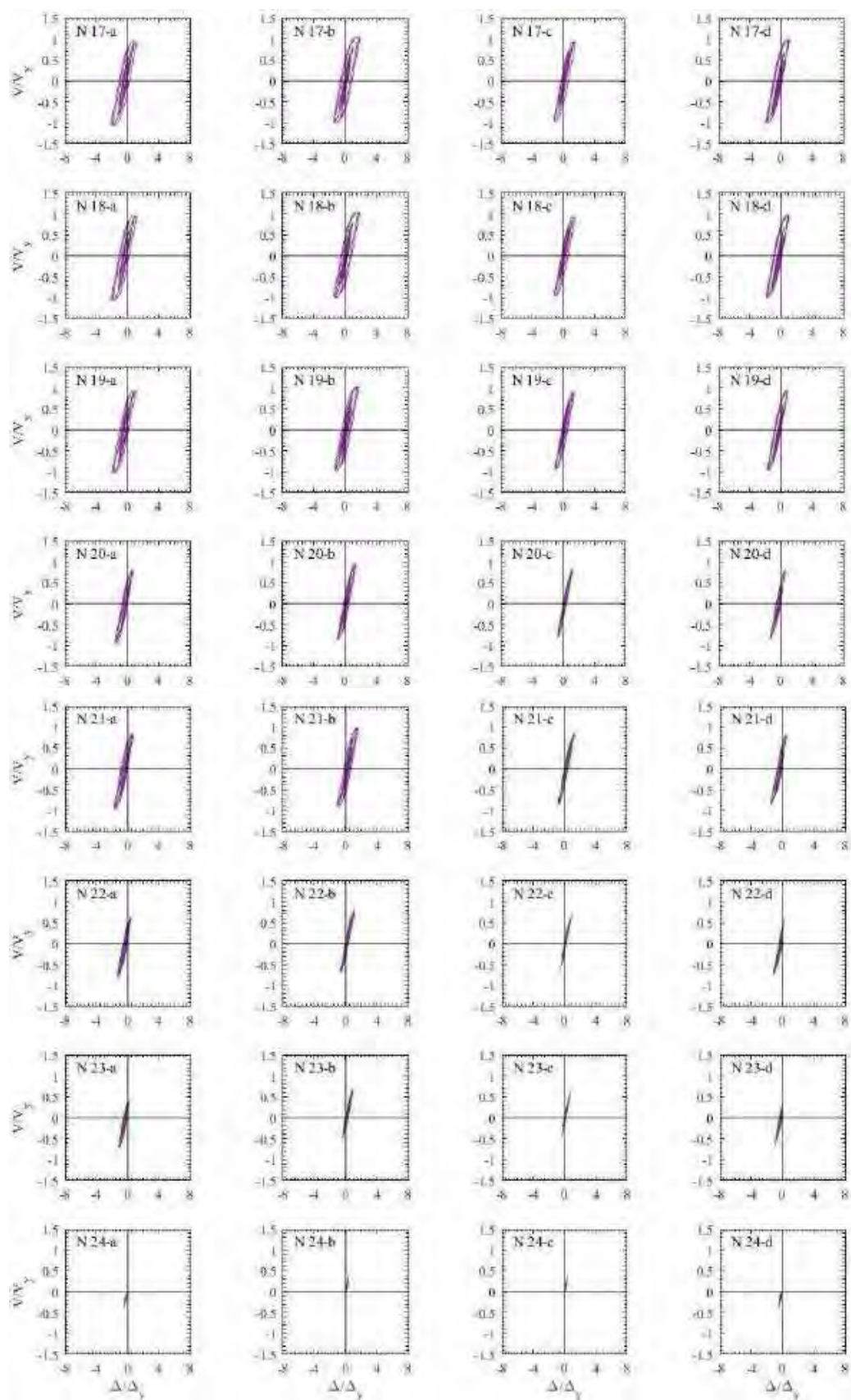
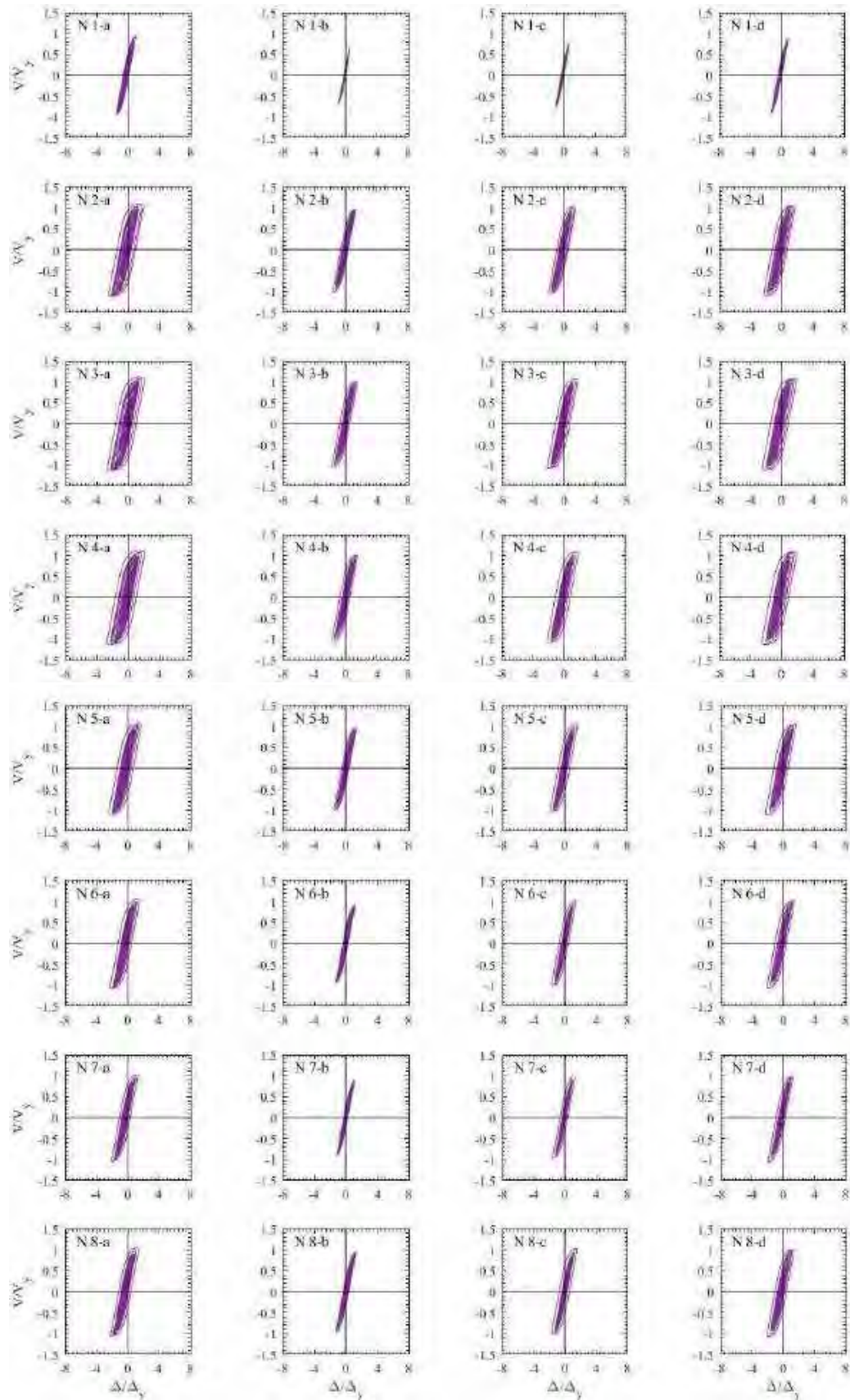
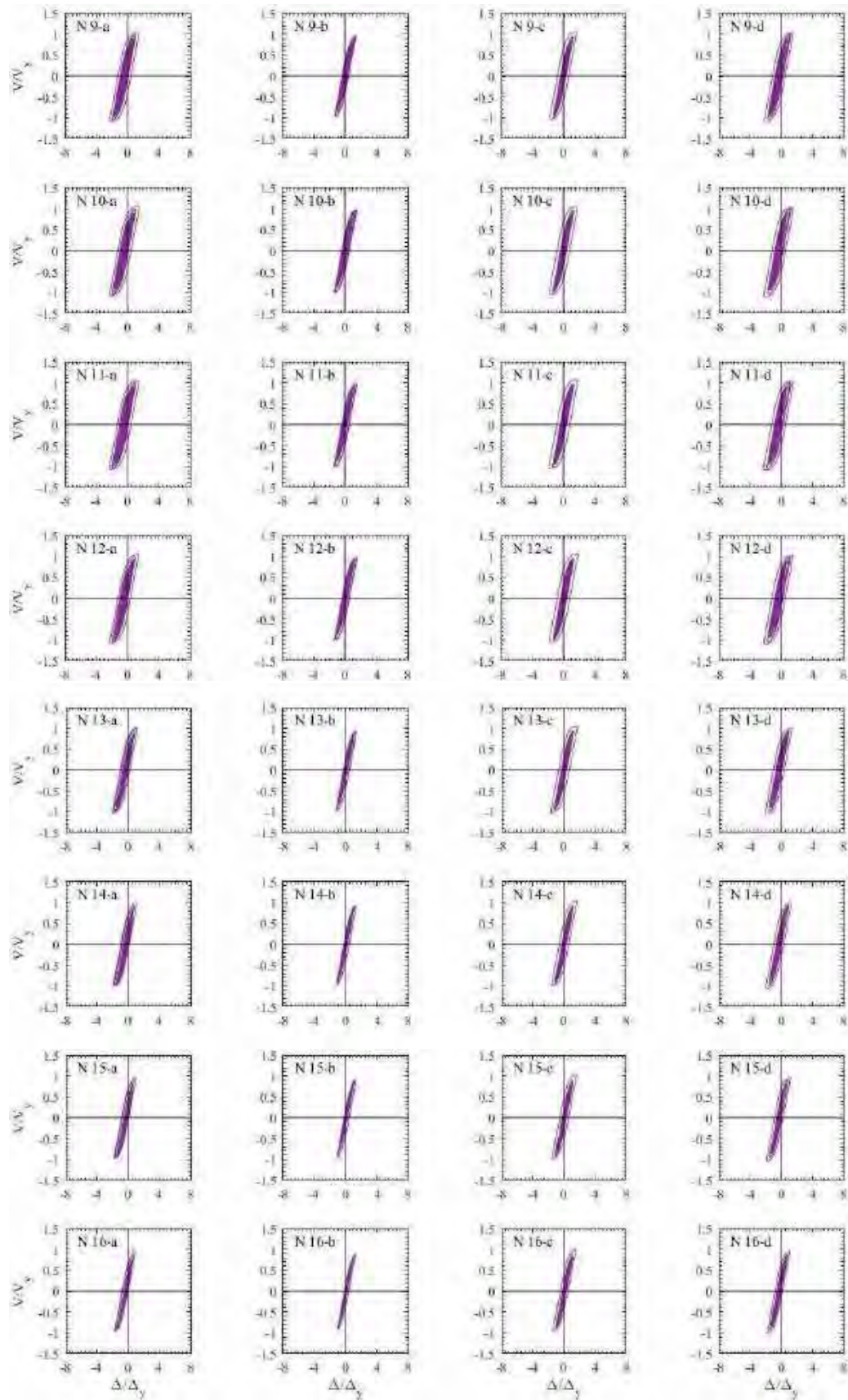


Figura H.152. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración TBOM –B (1985)





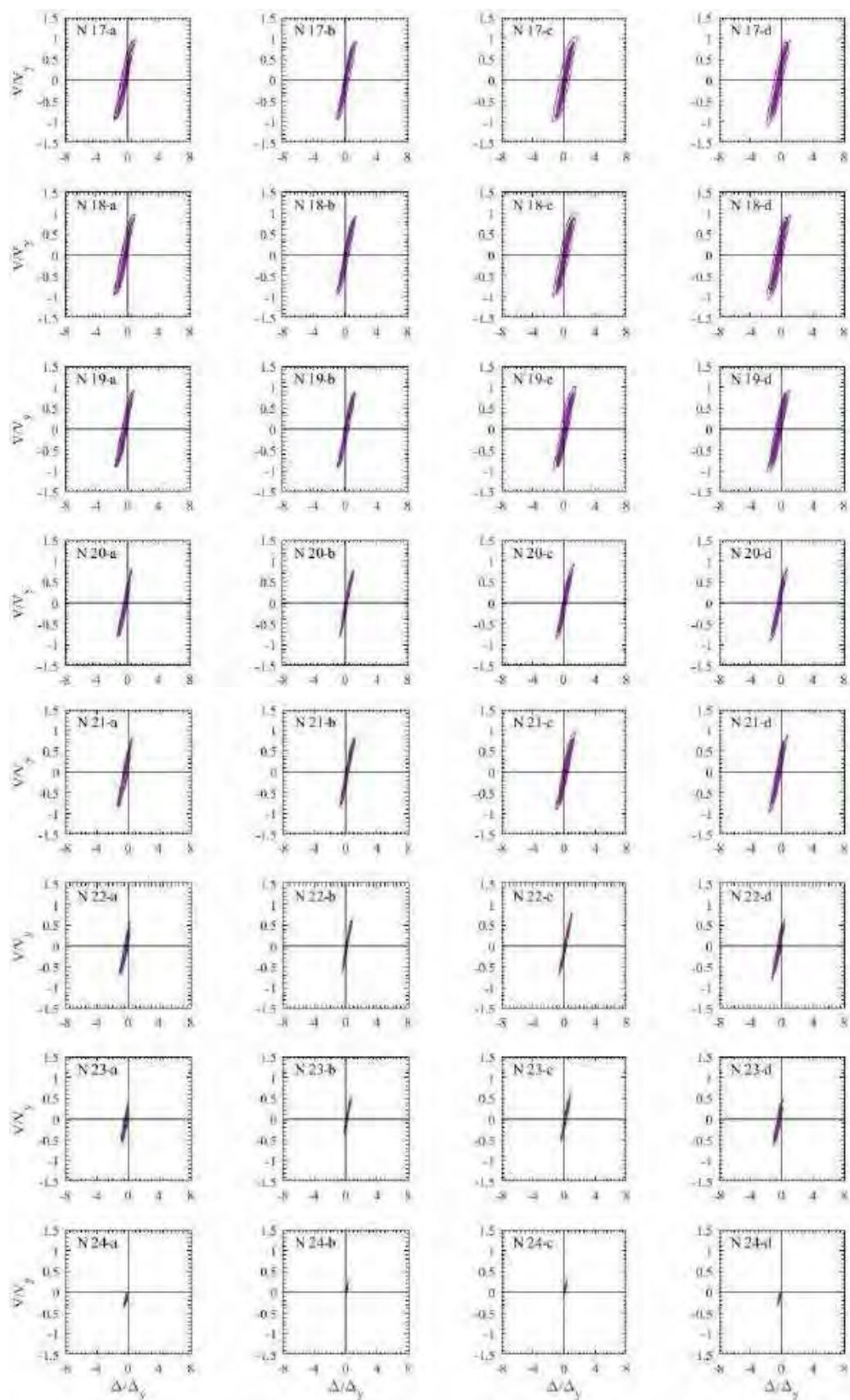
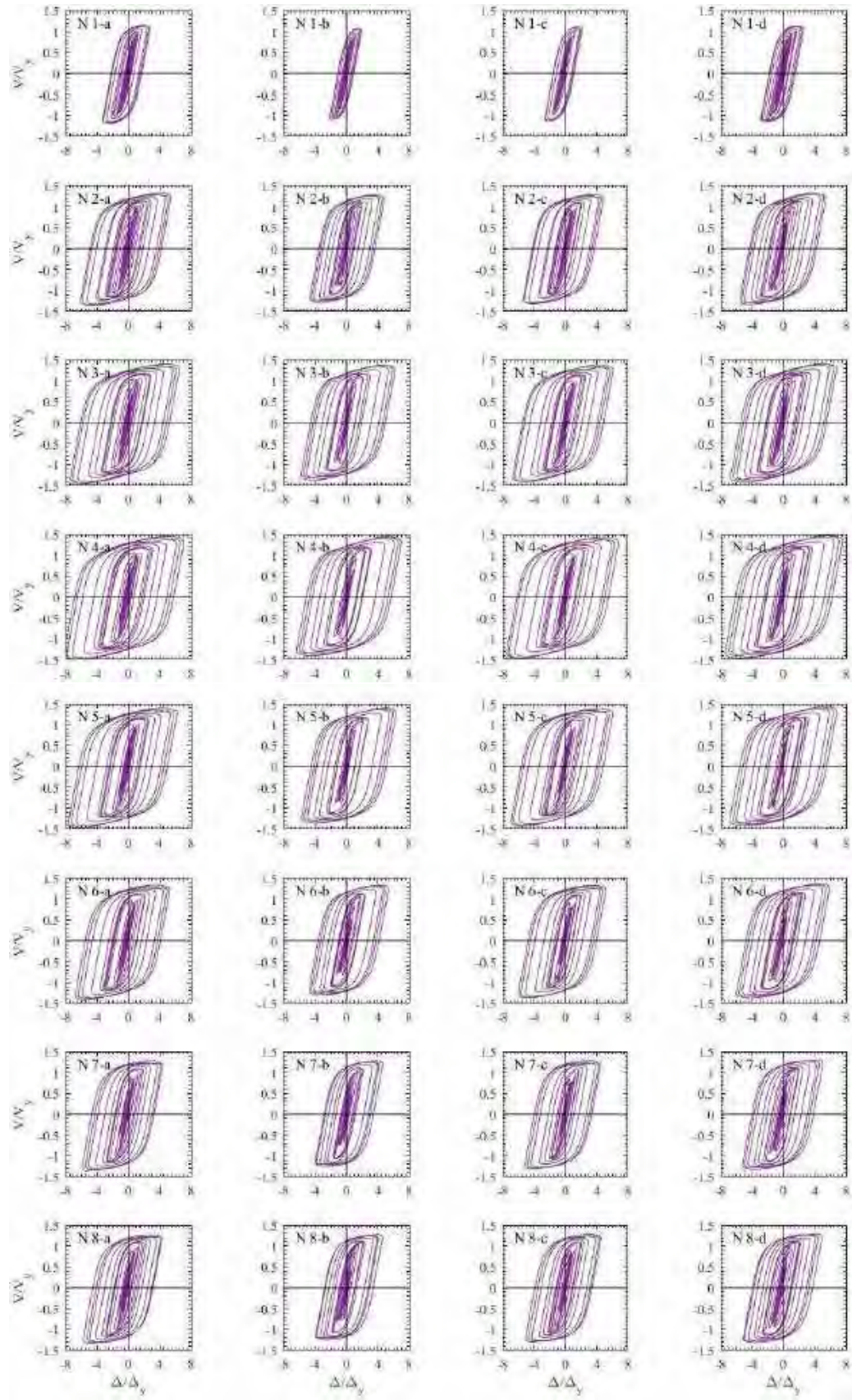
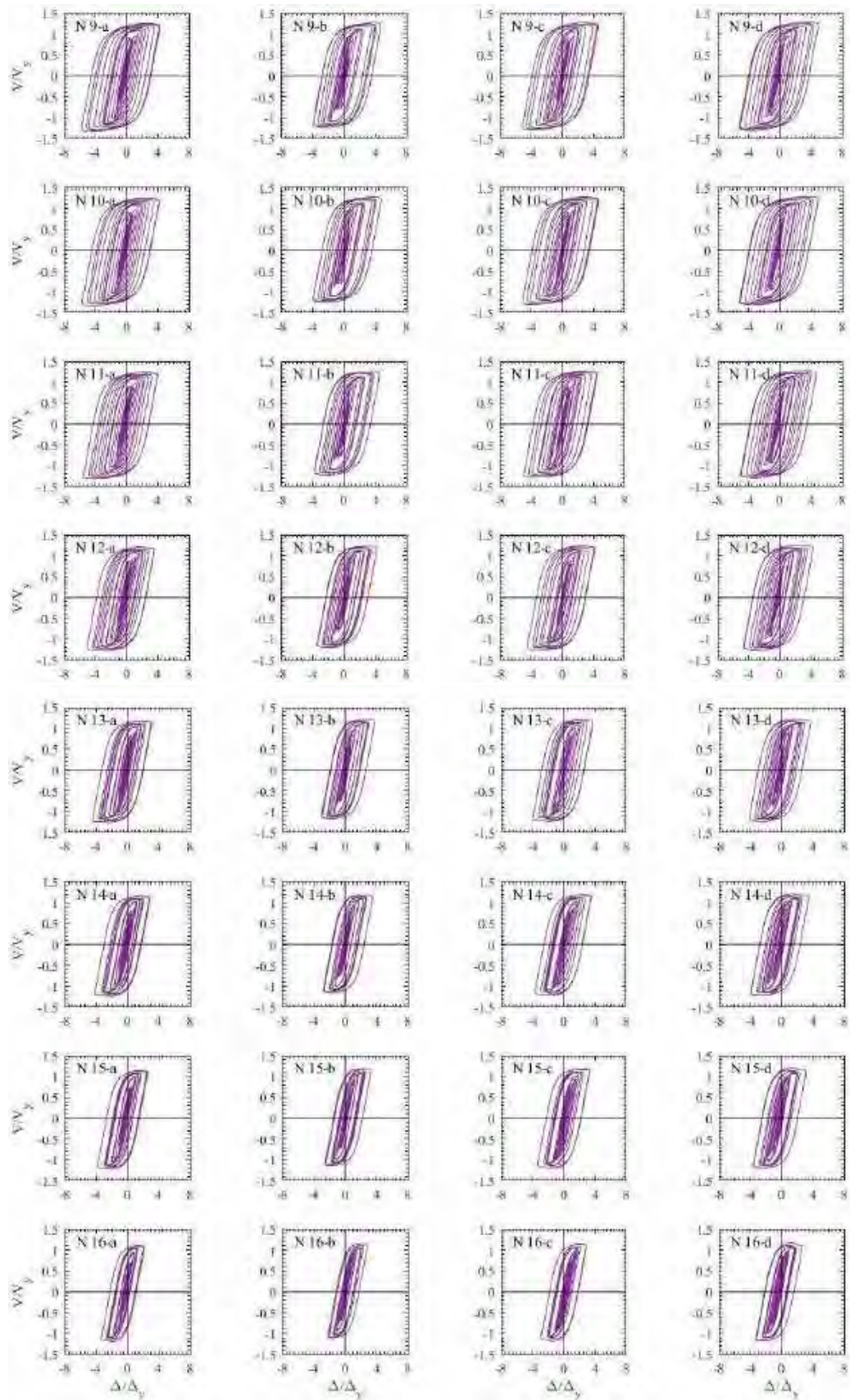


Figura H.153. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SCT185-A (1985)





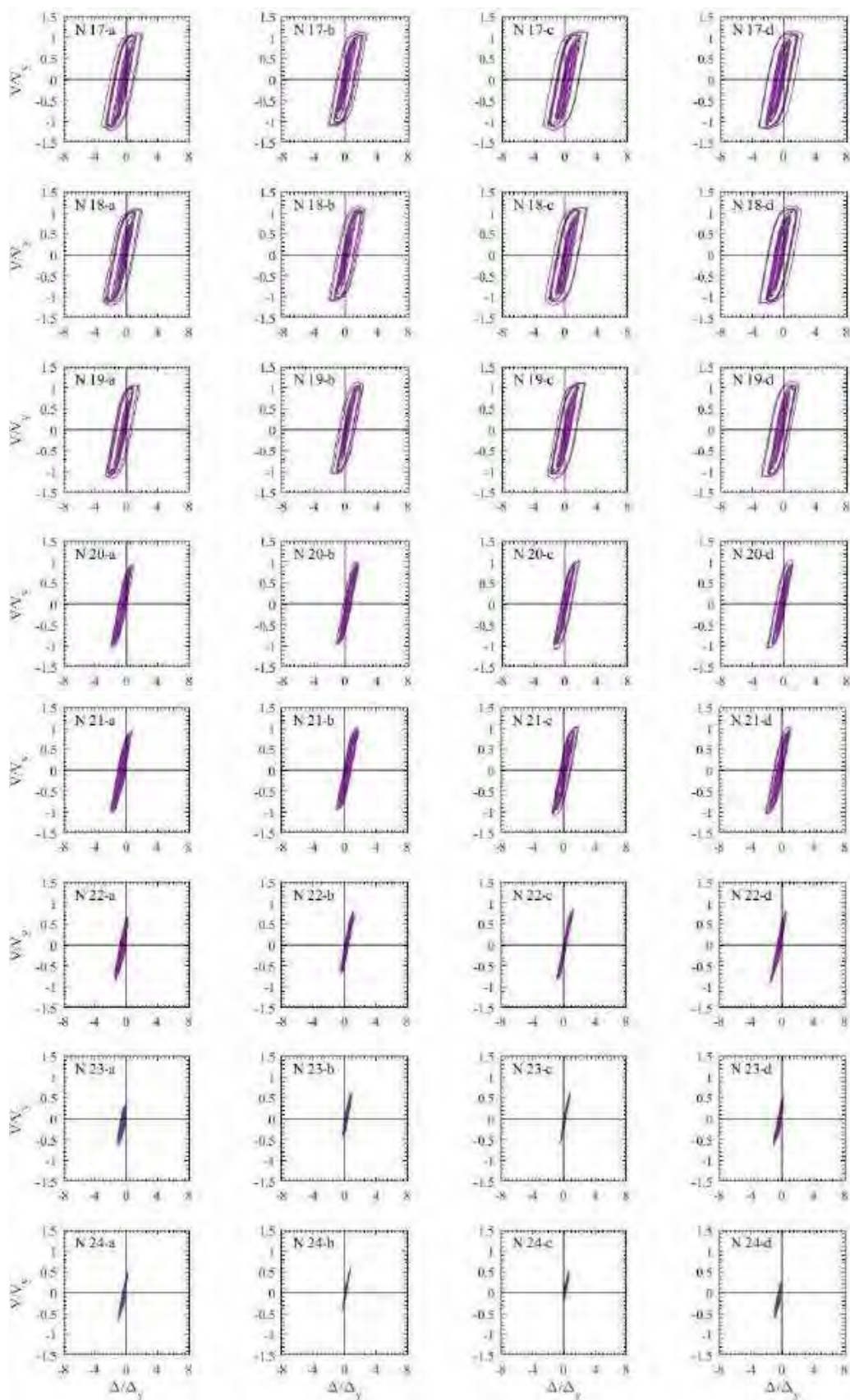
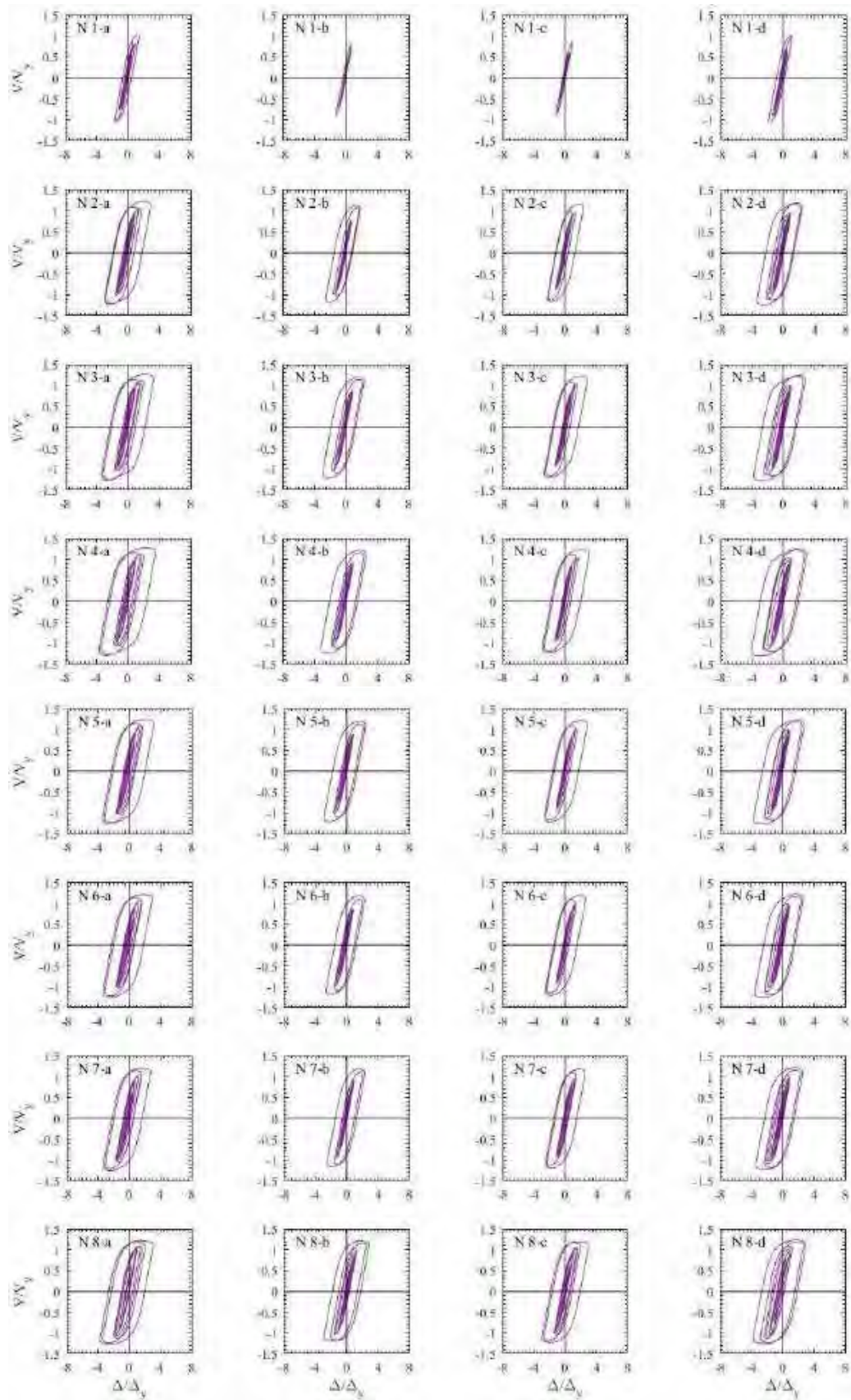
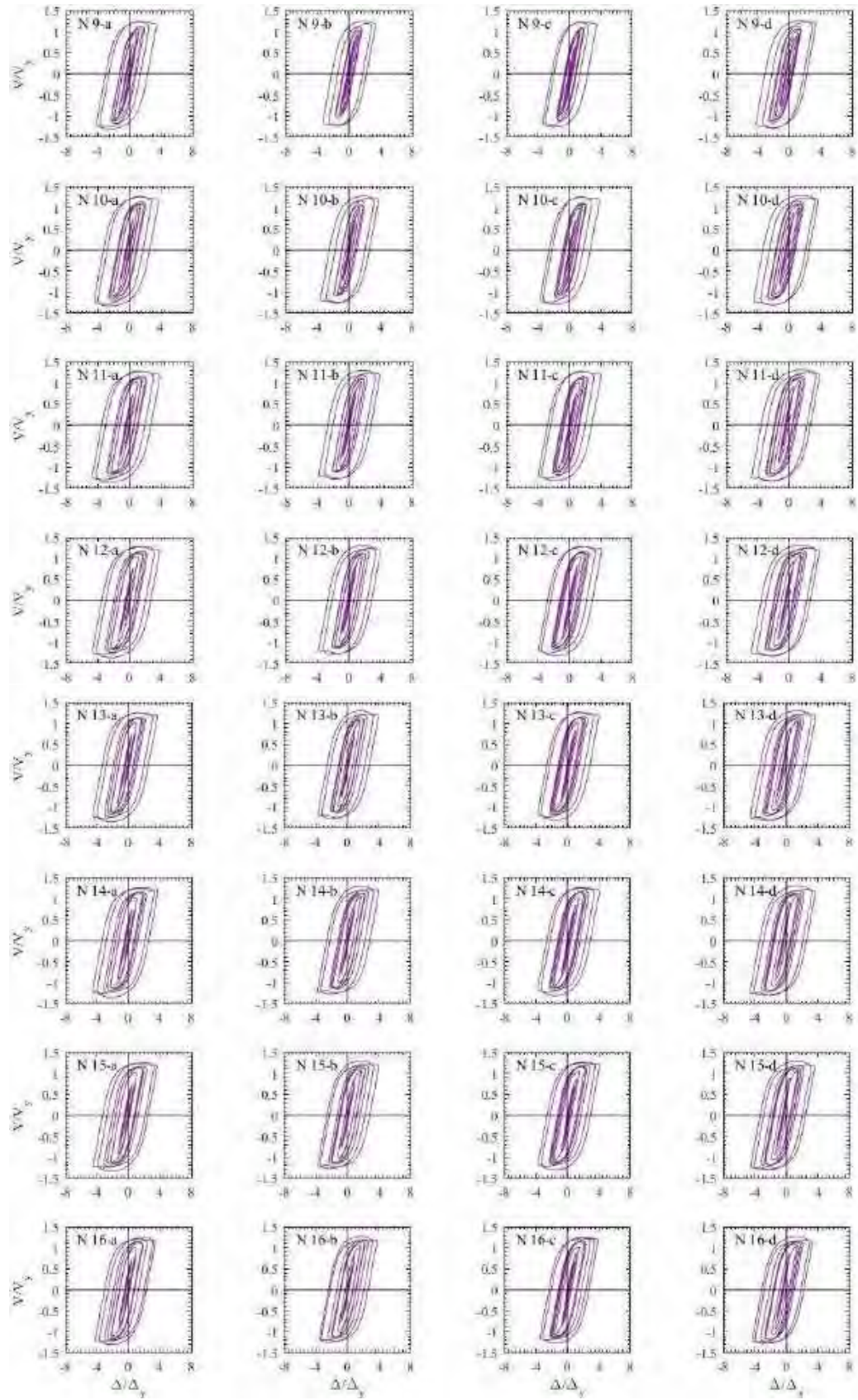


Figura H.154. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración SCT185-B (1985)





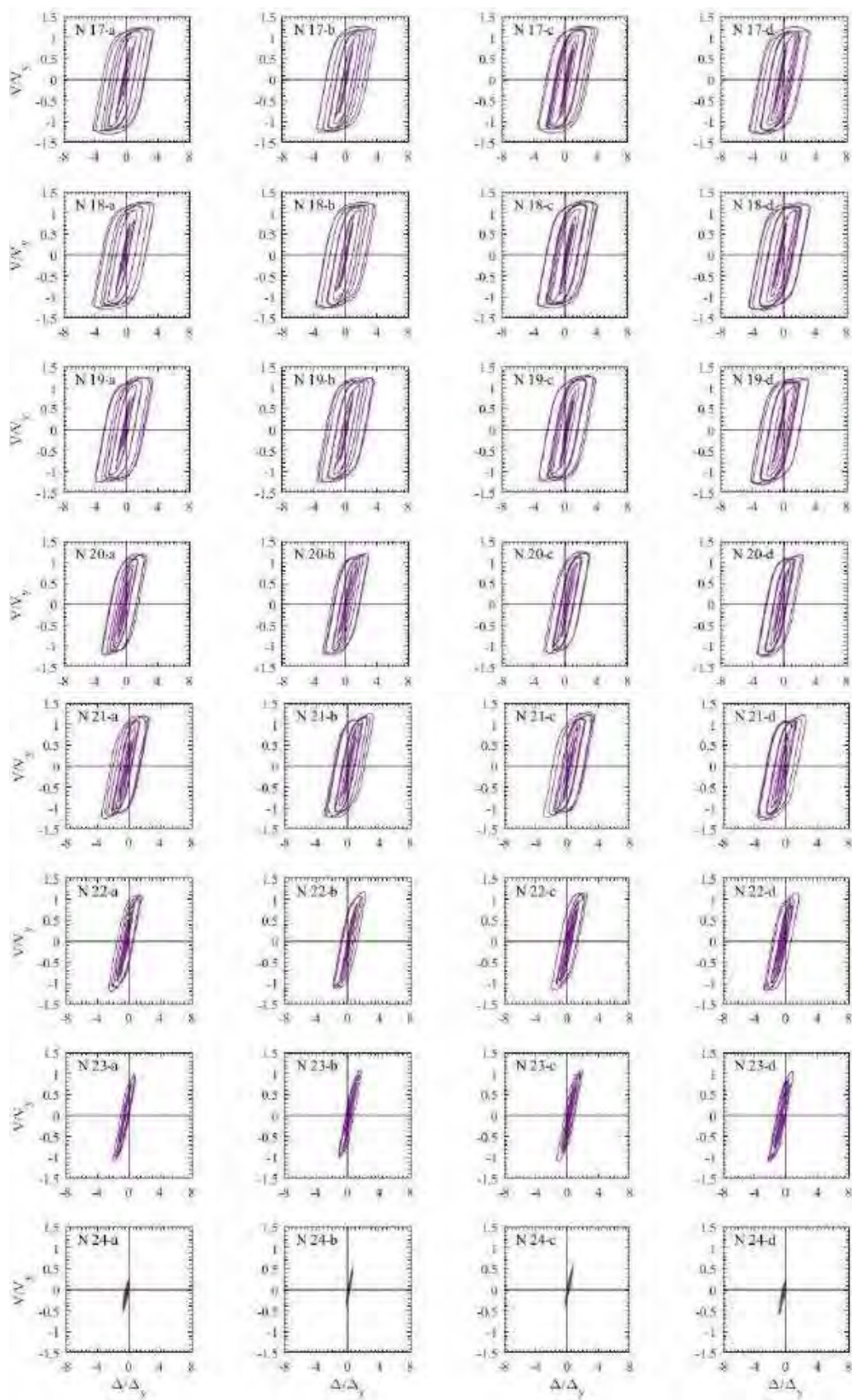
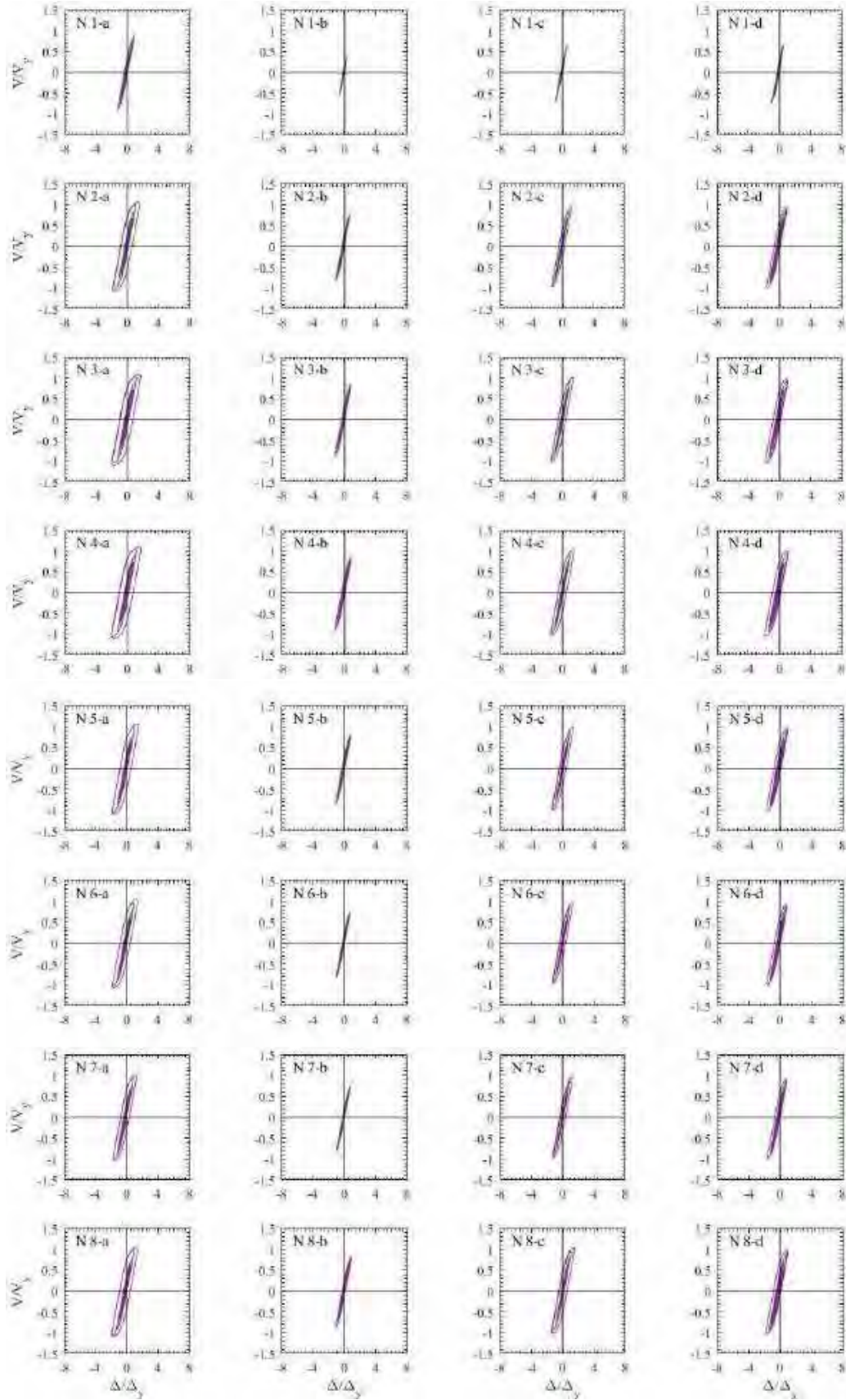
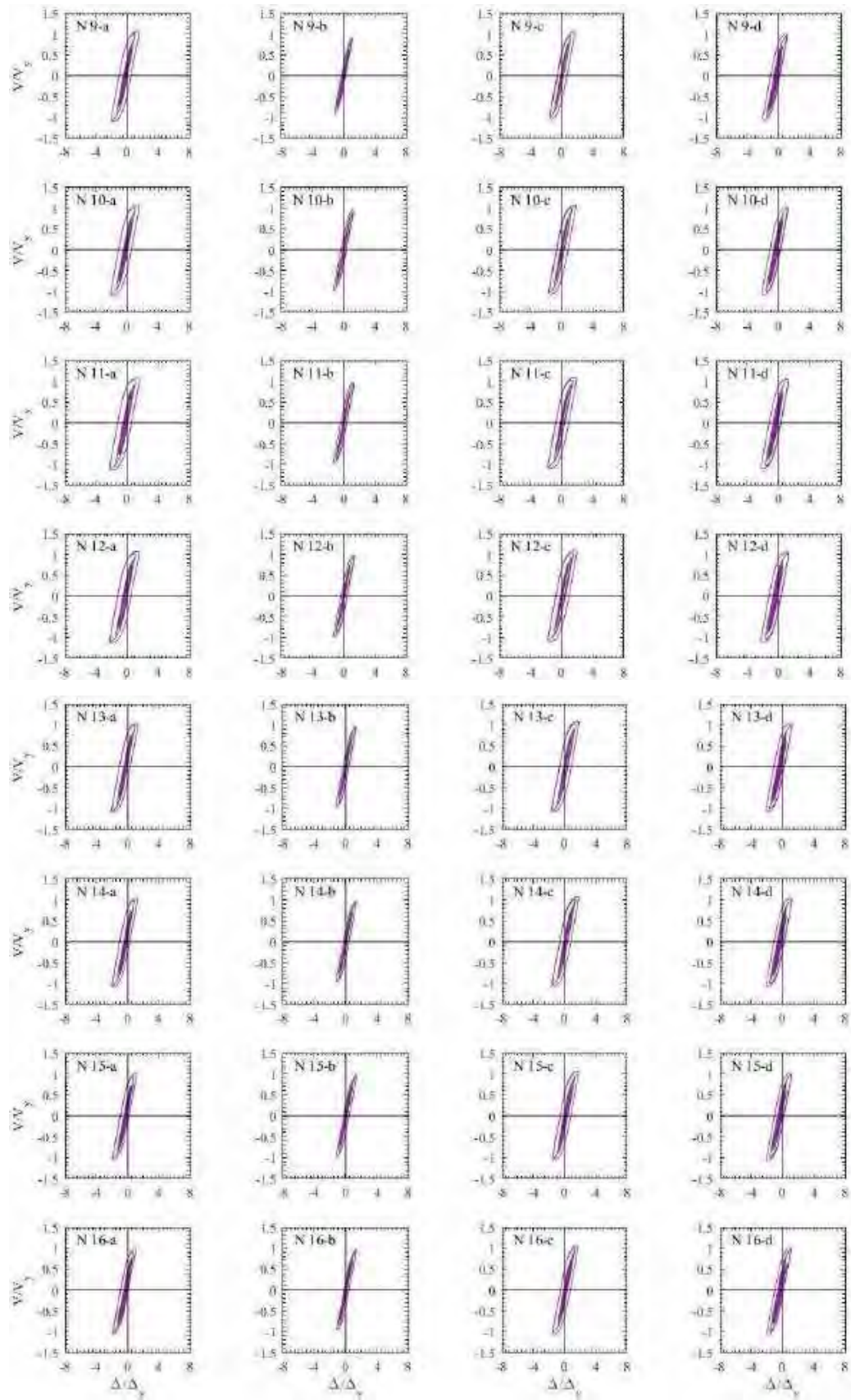


Figura H.155. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CH84-A (2017)





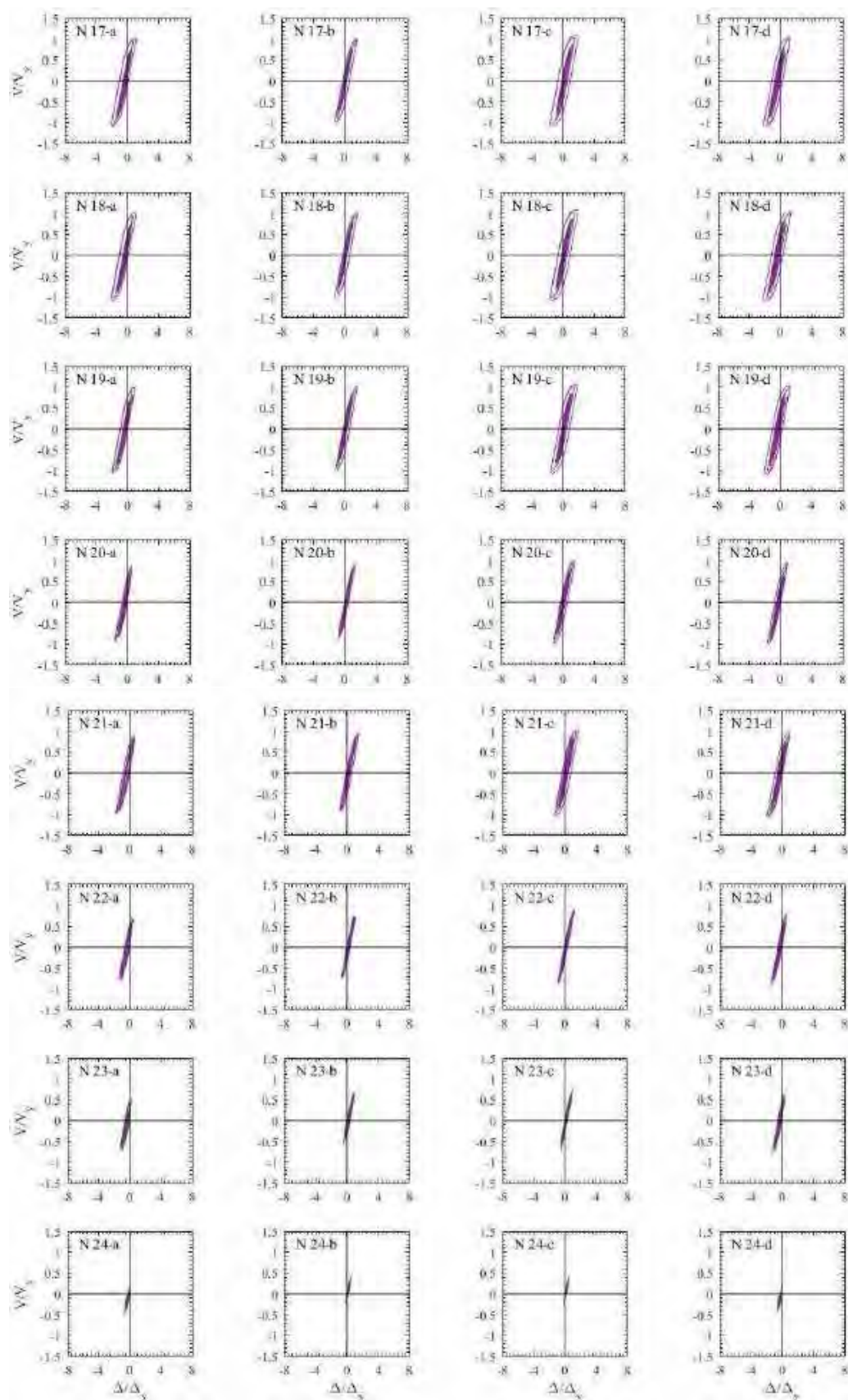
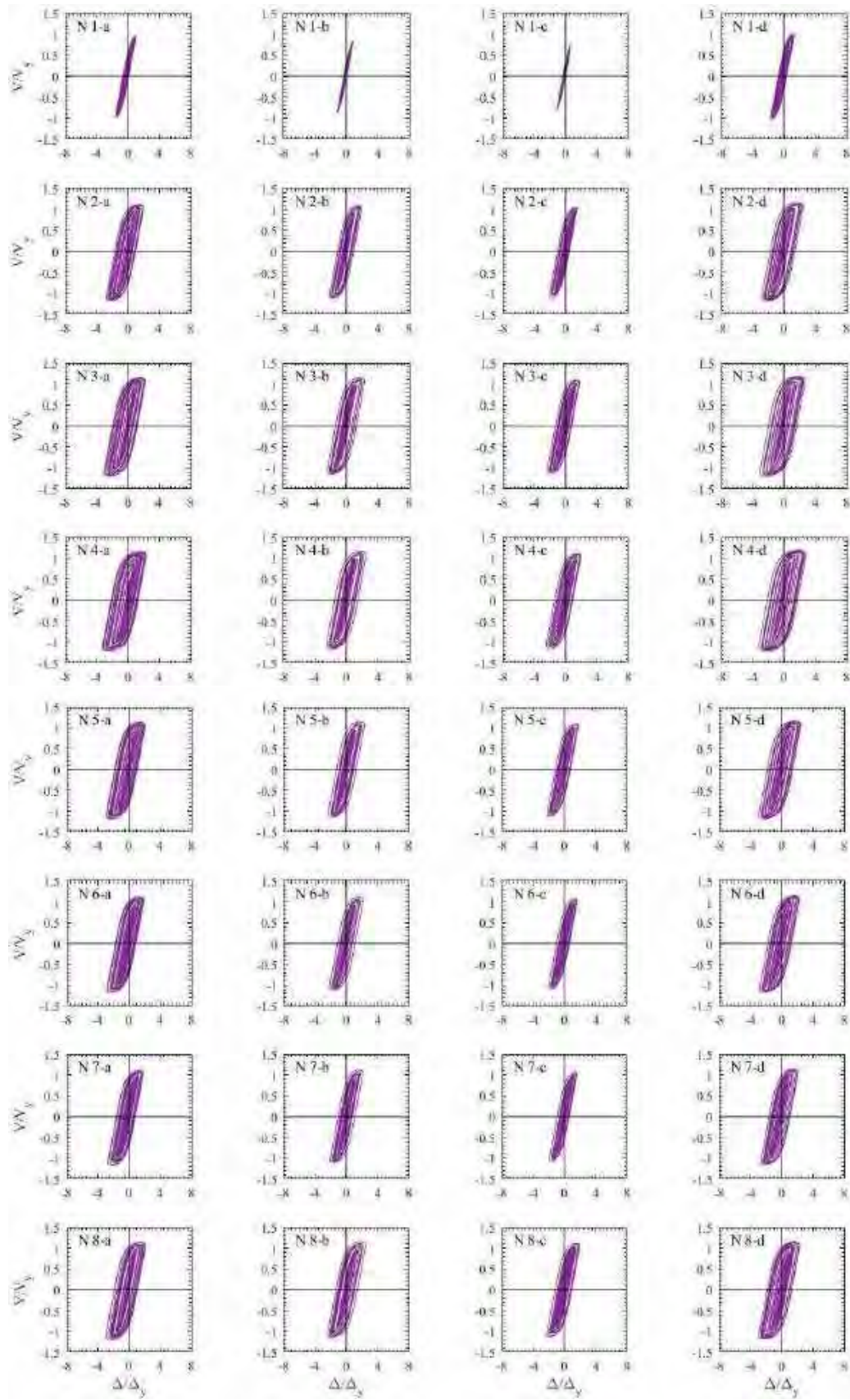
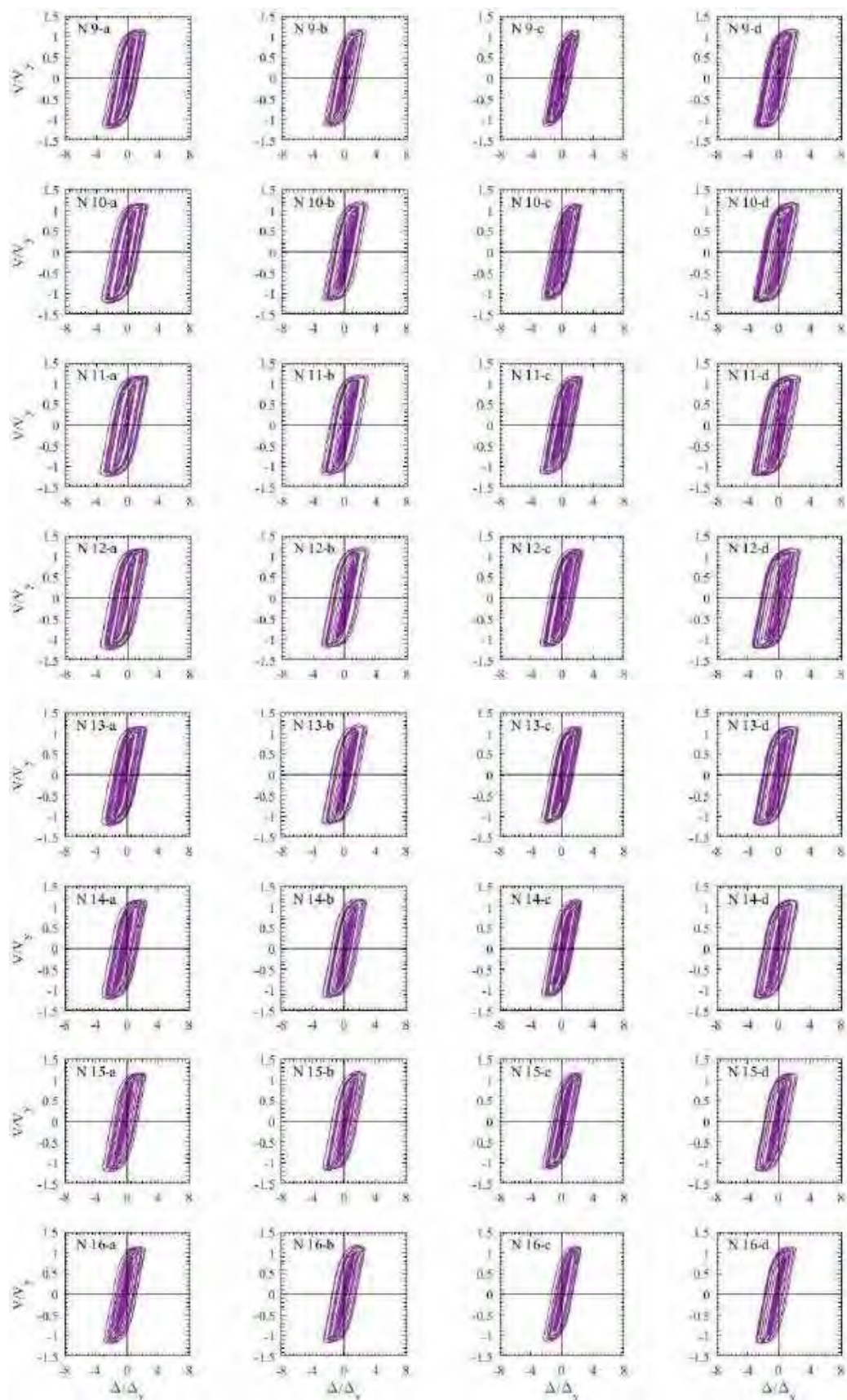


Figura H.156. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración CH84-B (2017)





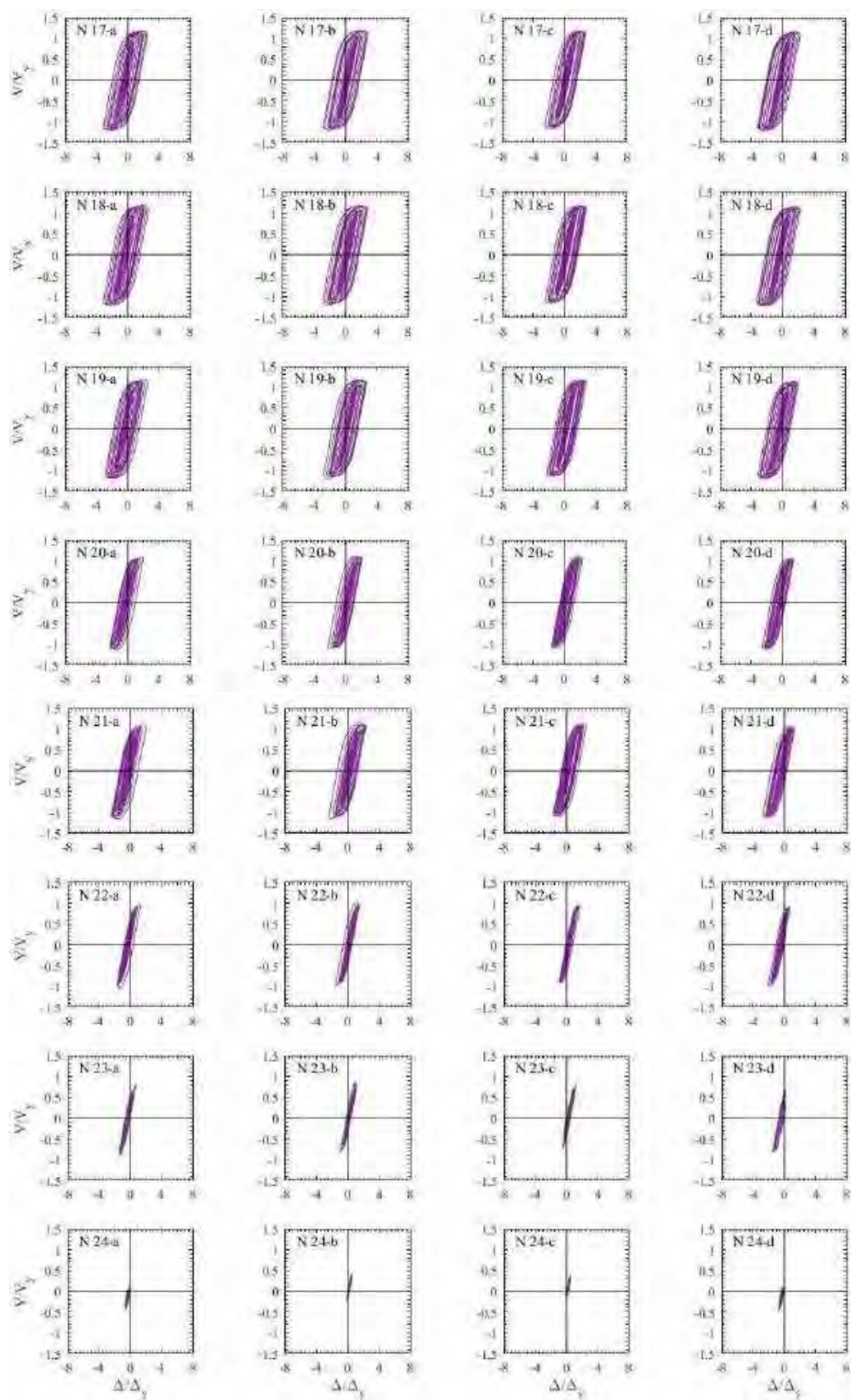
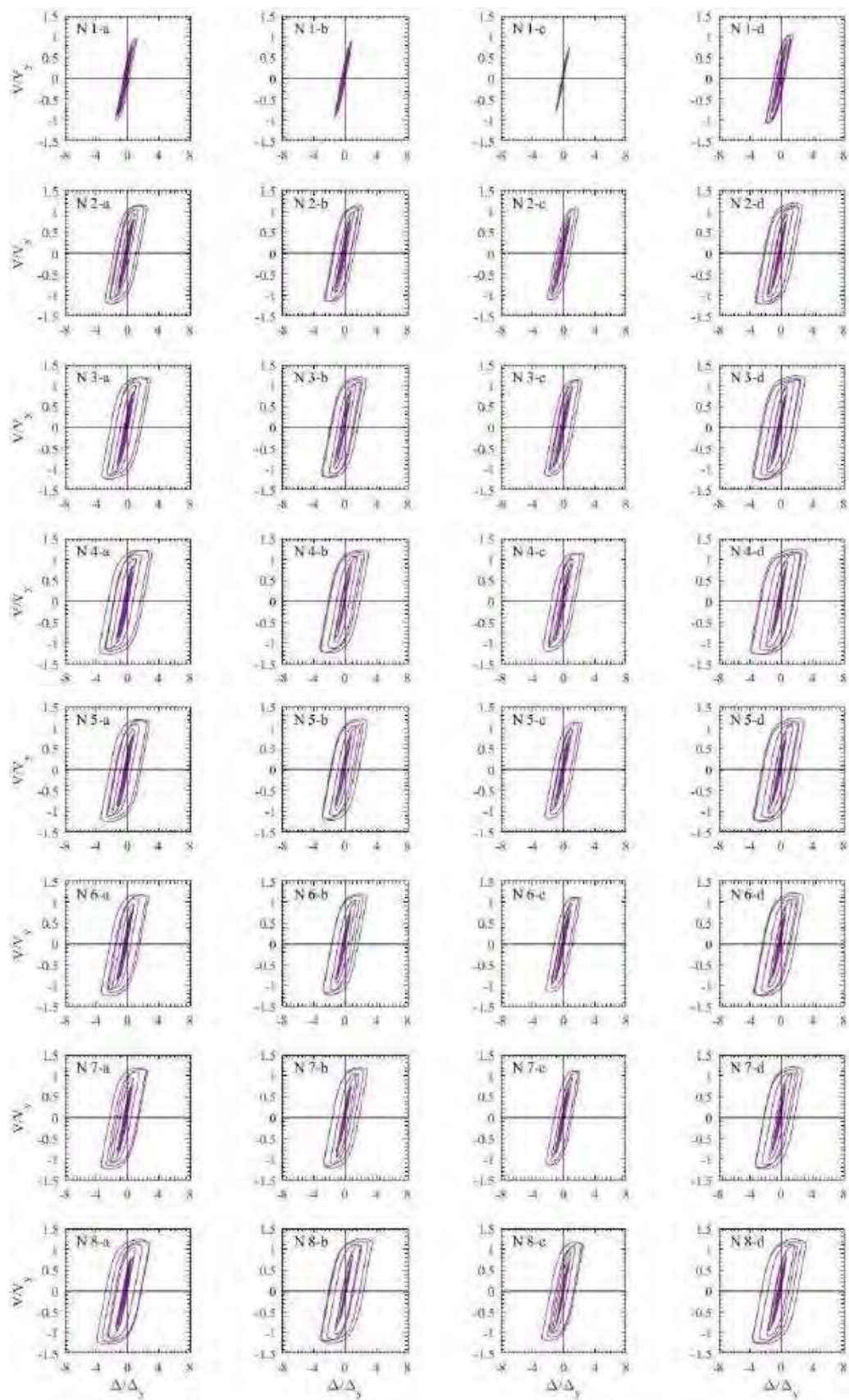
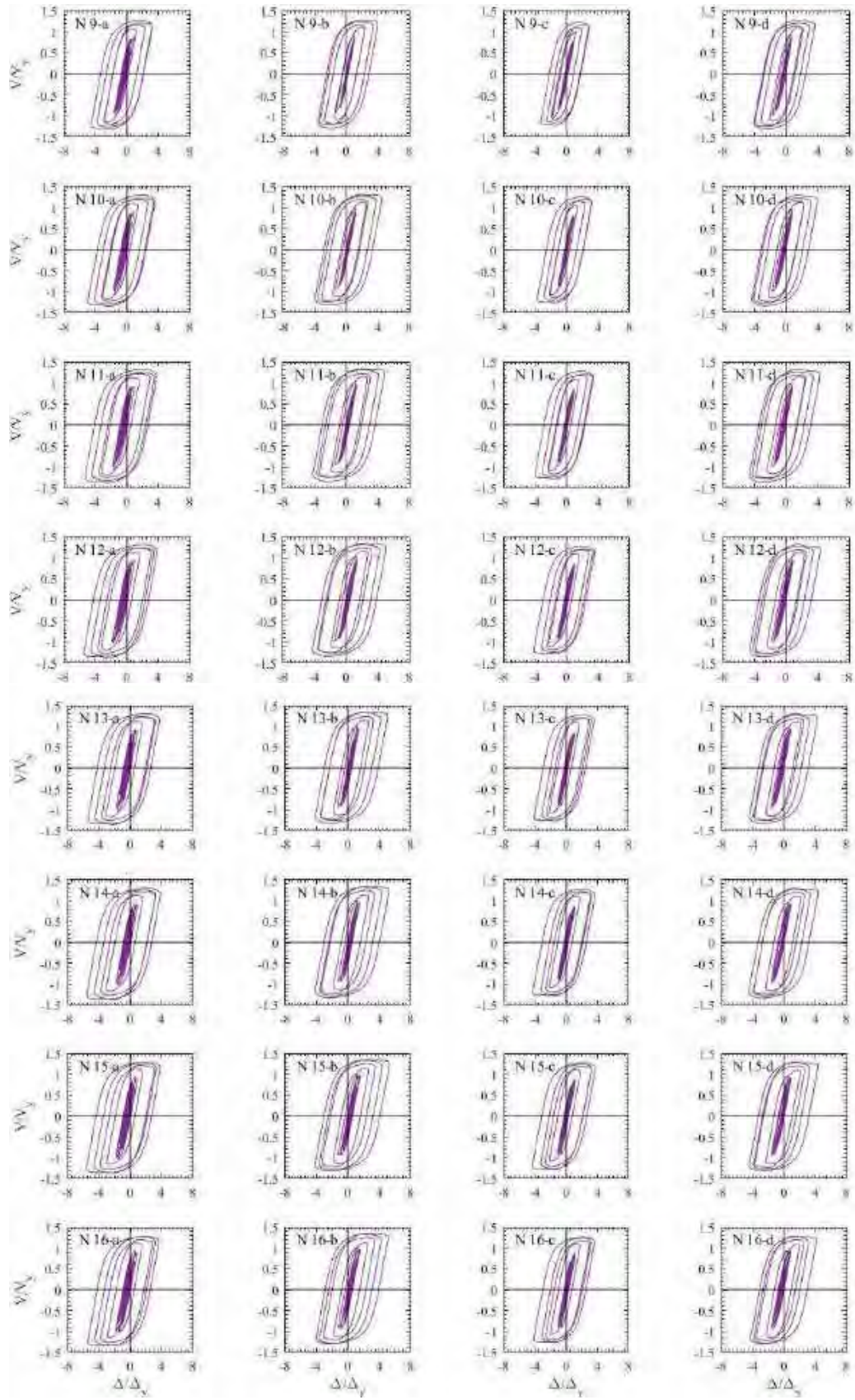


Figura H.157. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración MI15-A (2017)





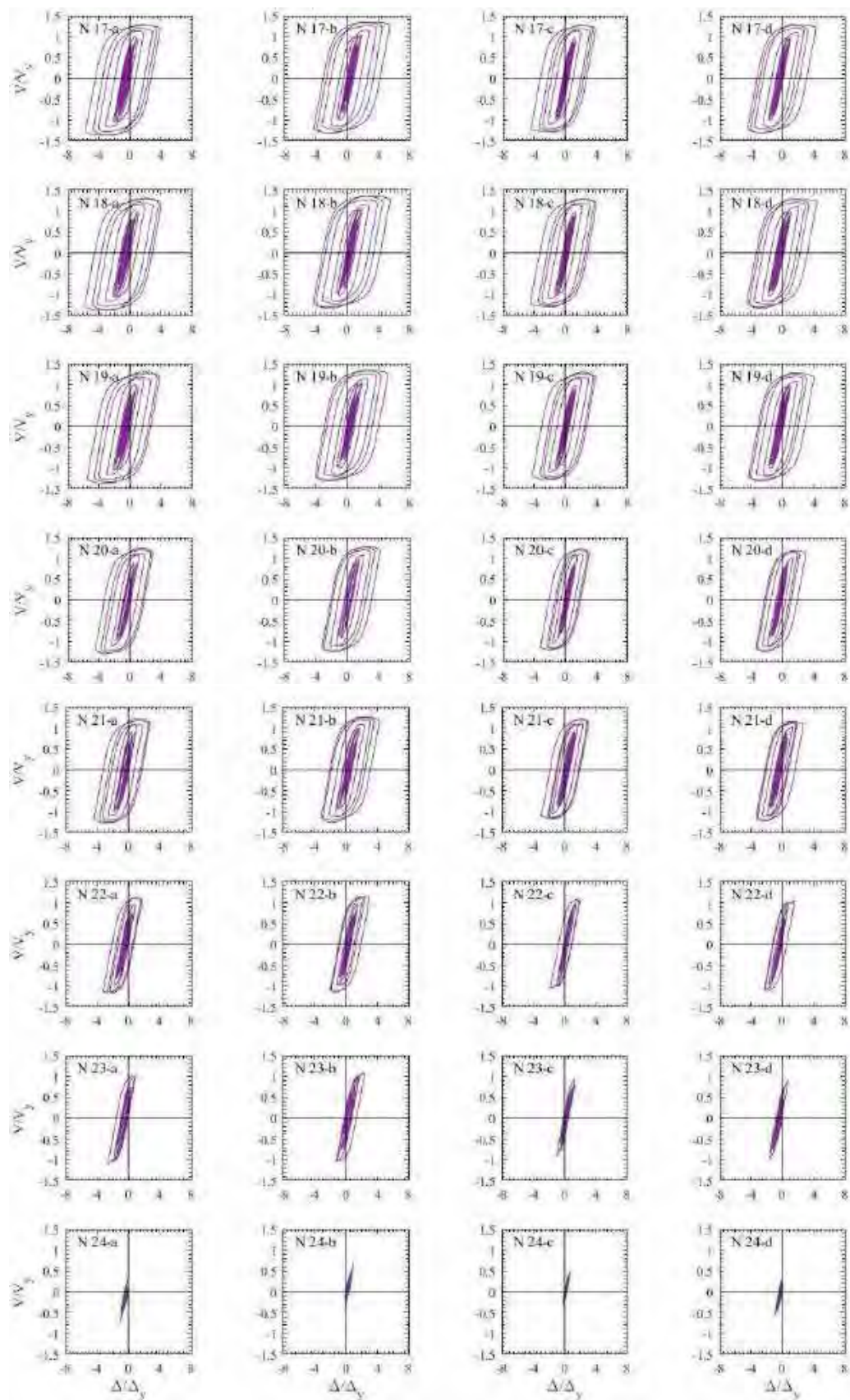
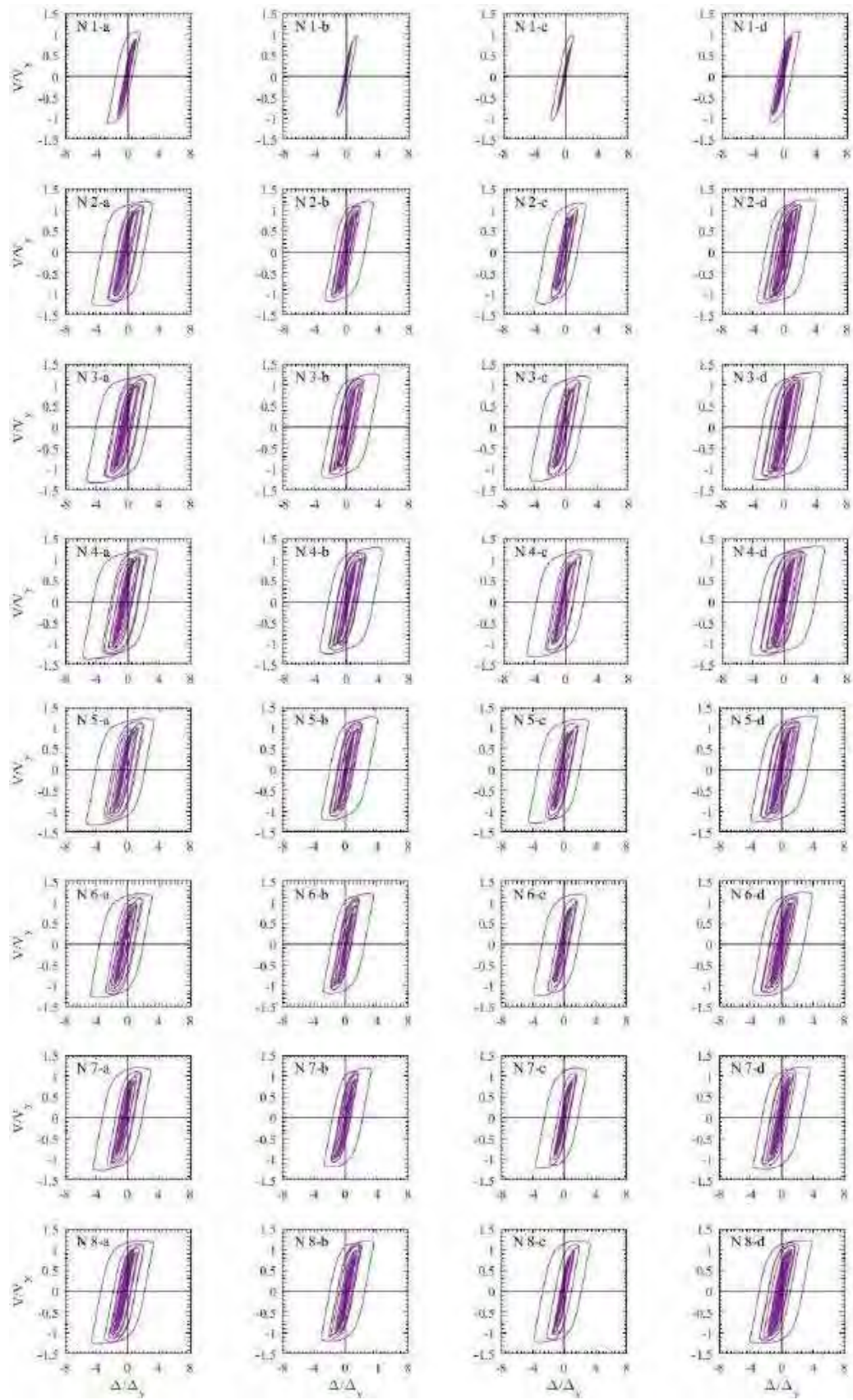
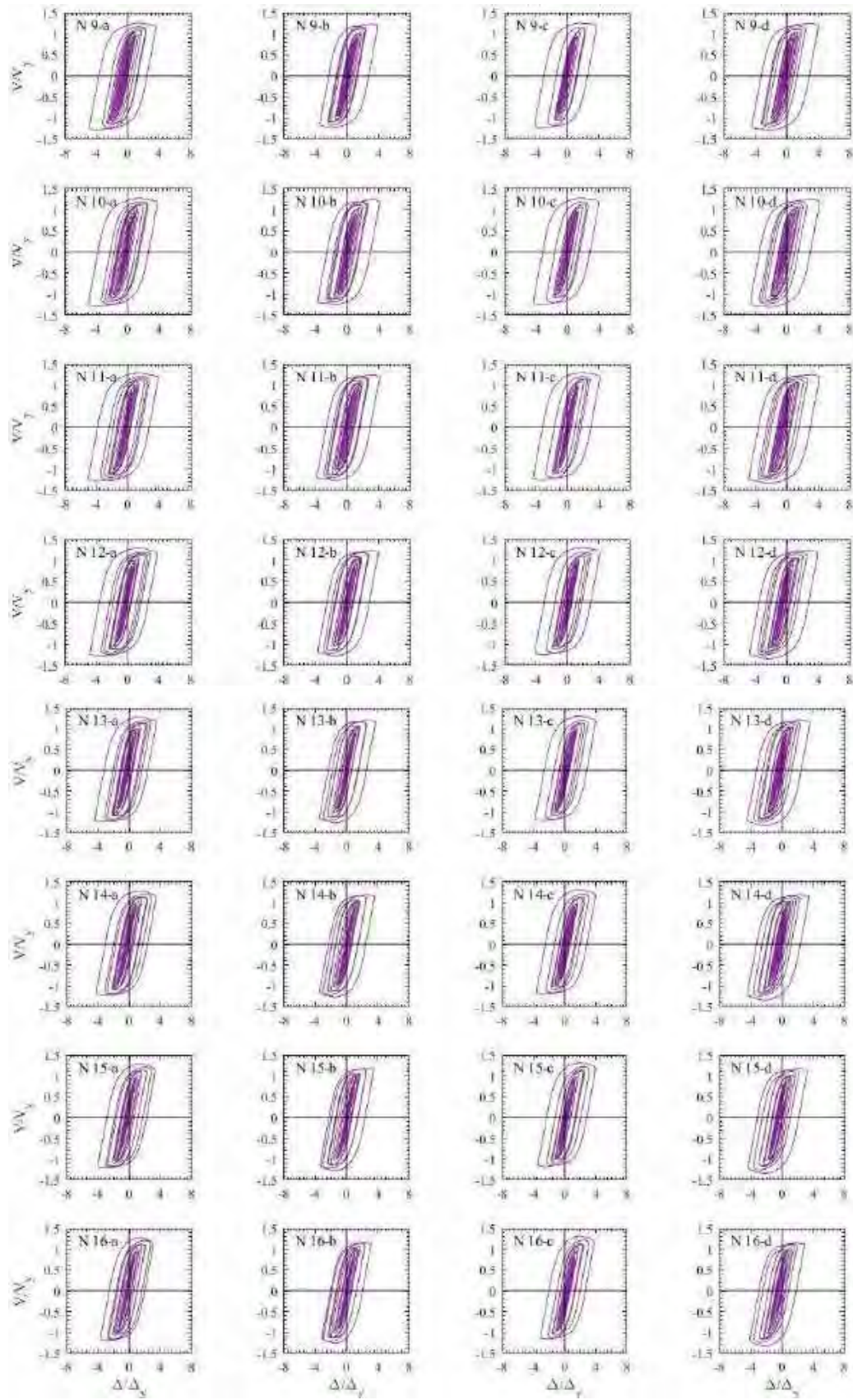


Figura H.158. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración MI15-B (2017)





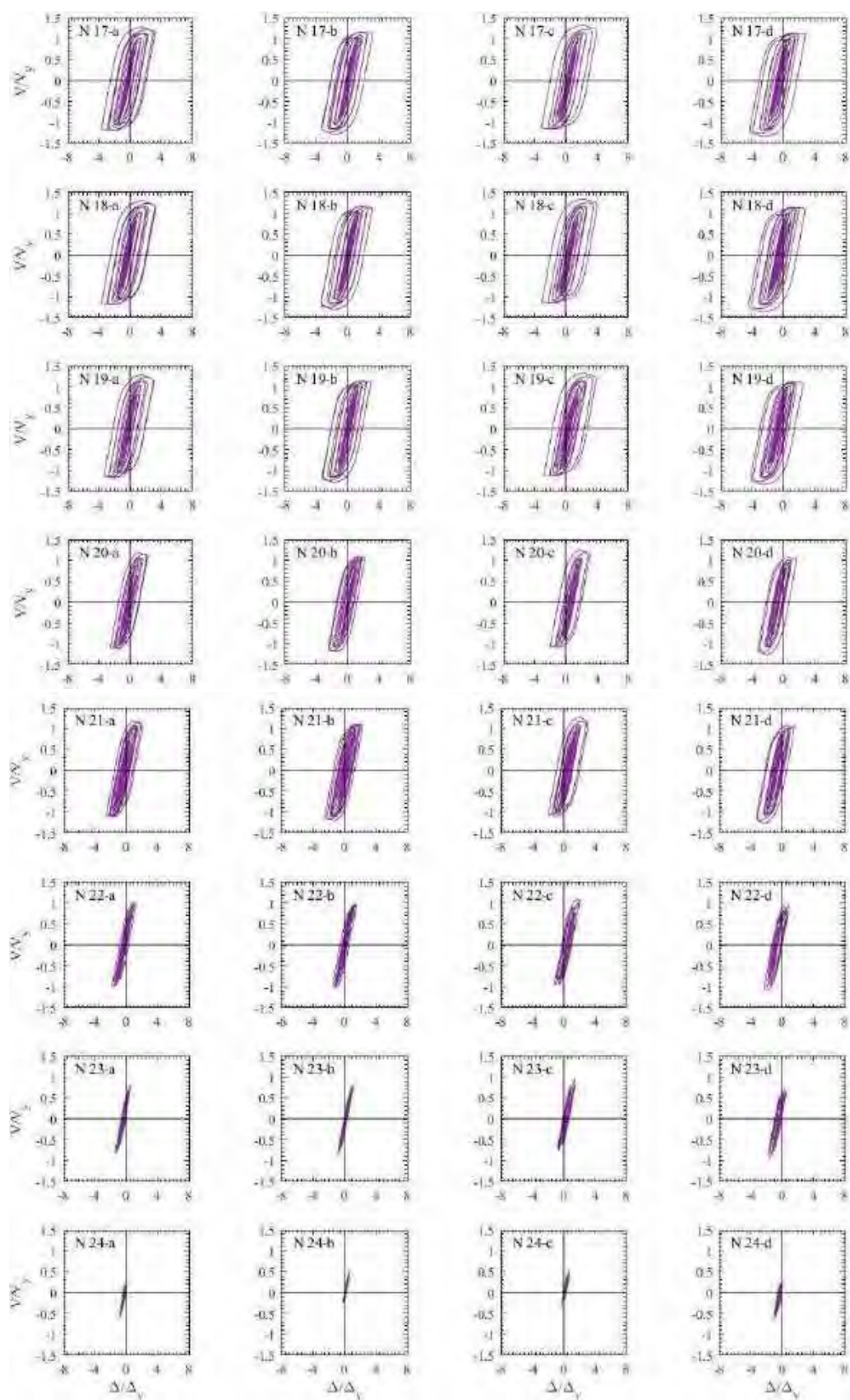
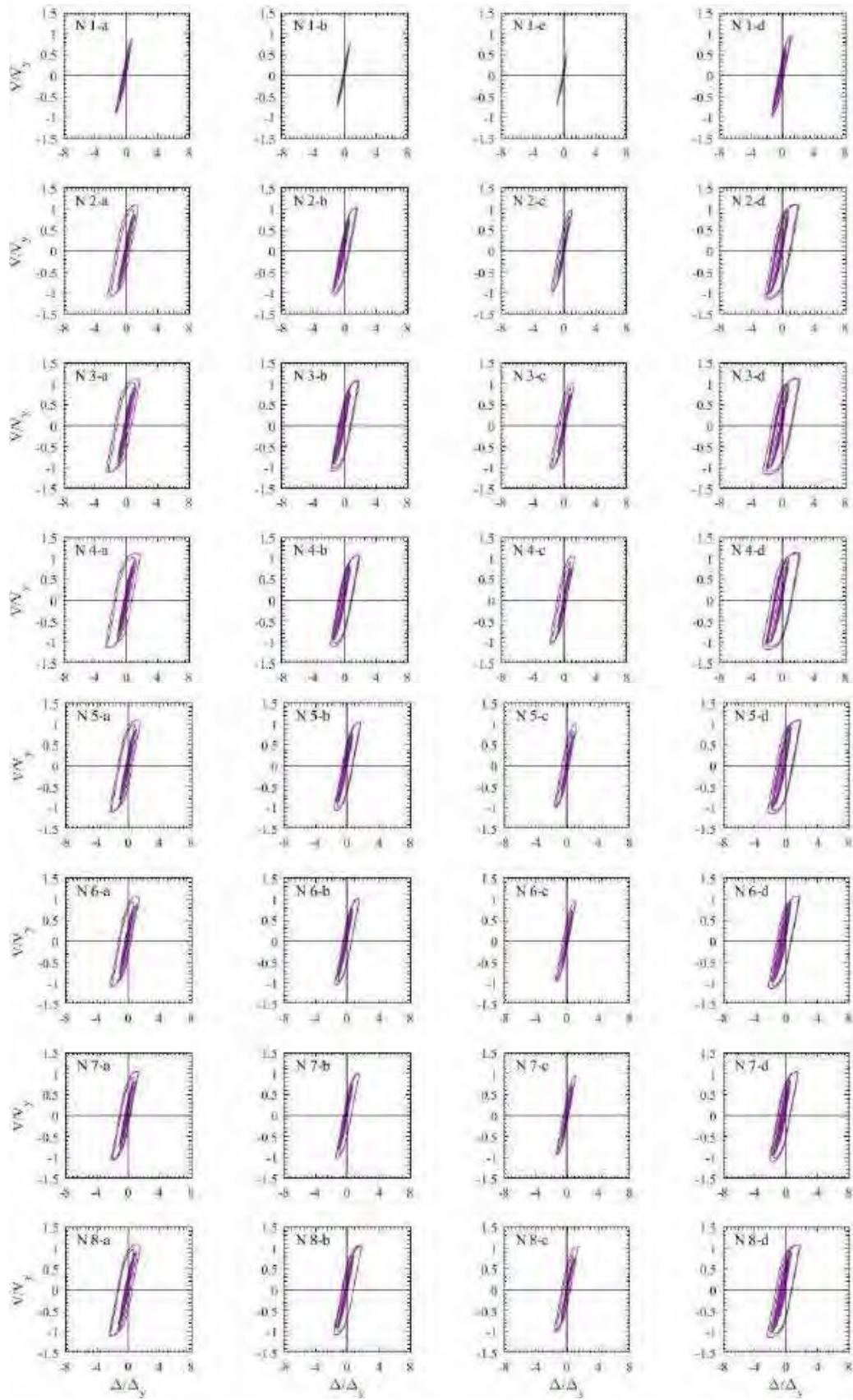
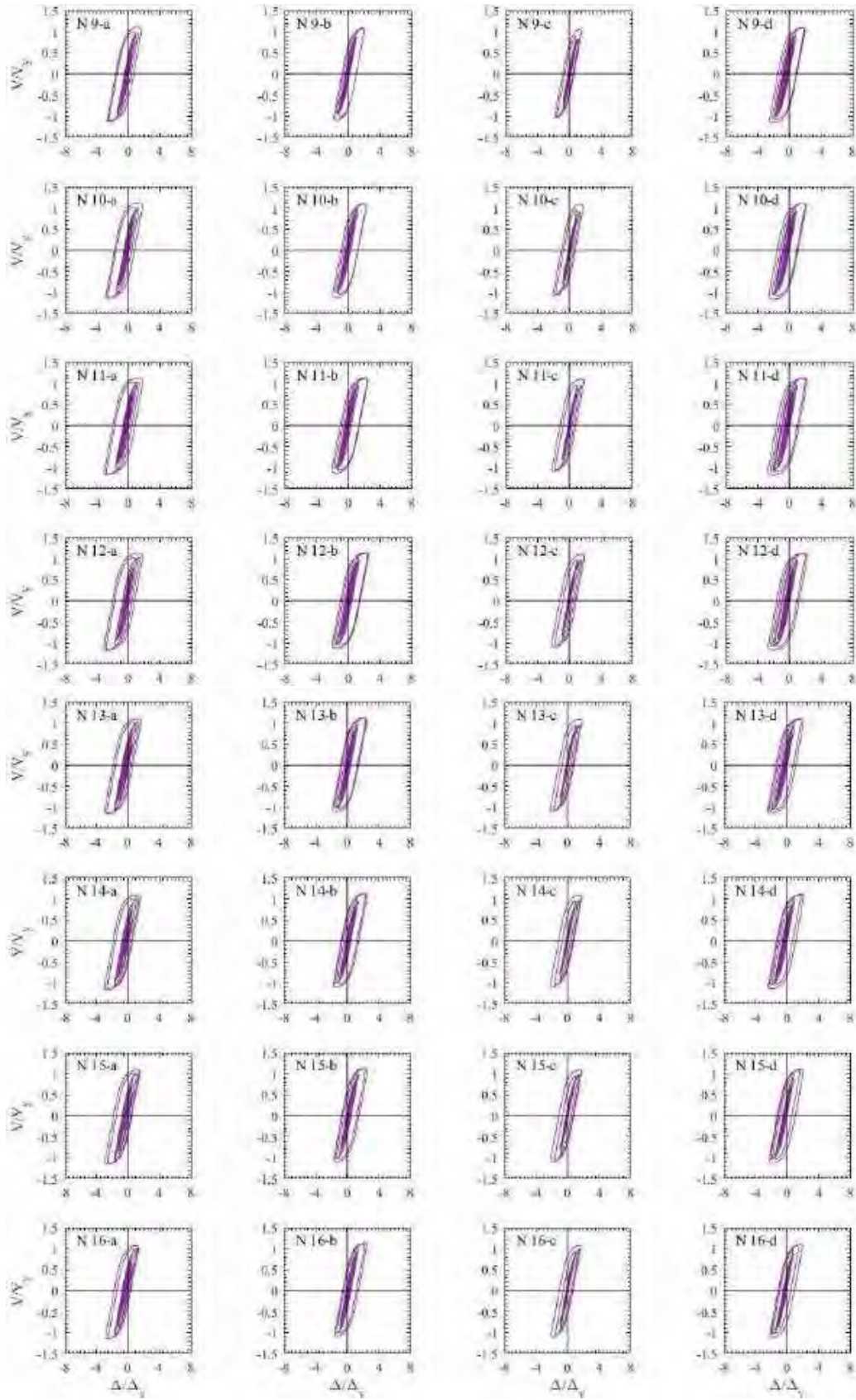


Figura H.159. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración XO36-A (2017)





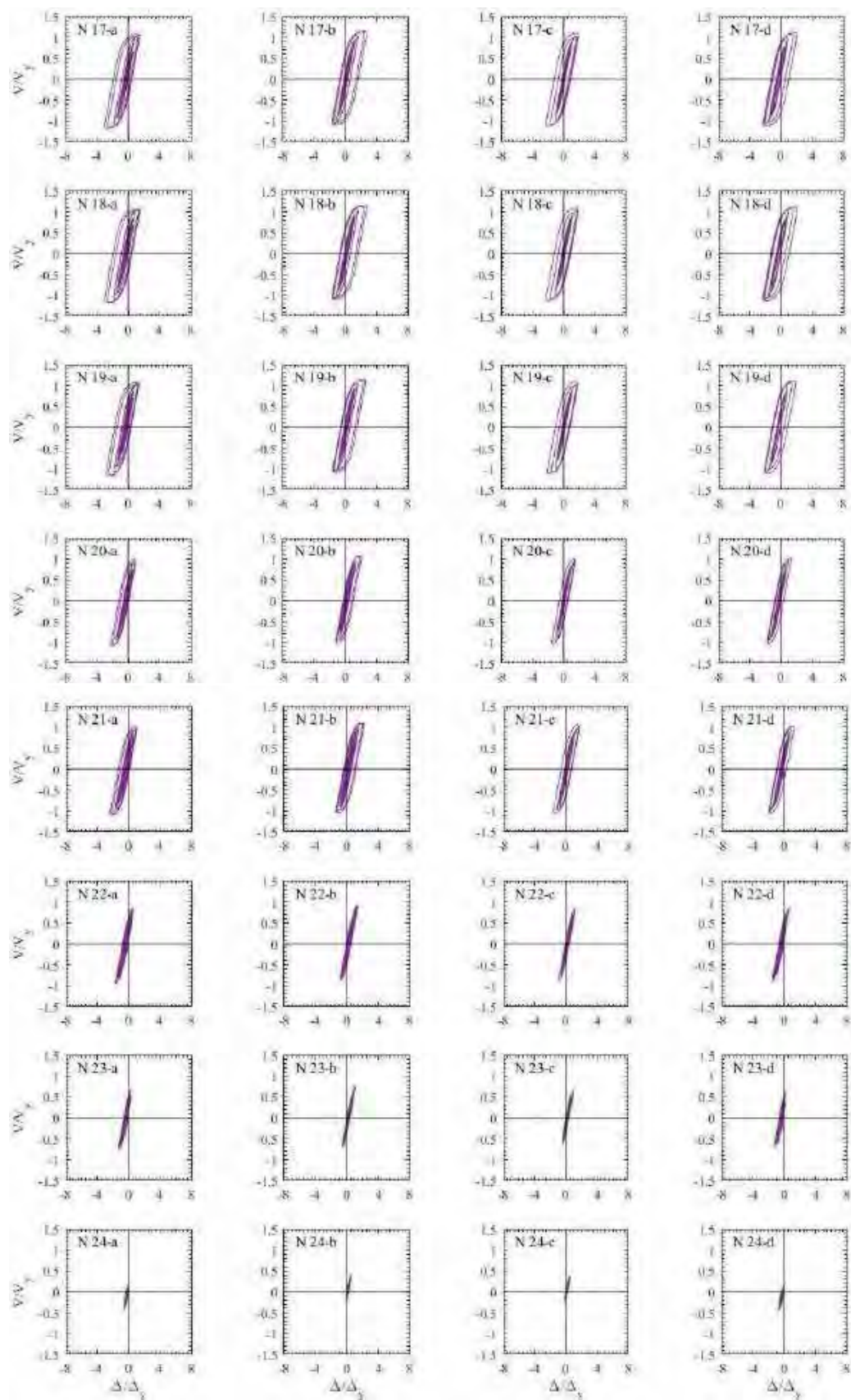
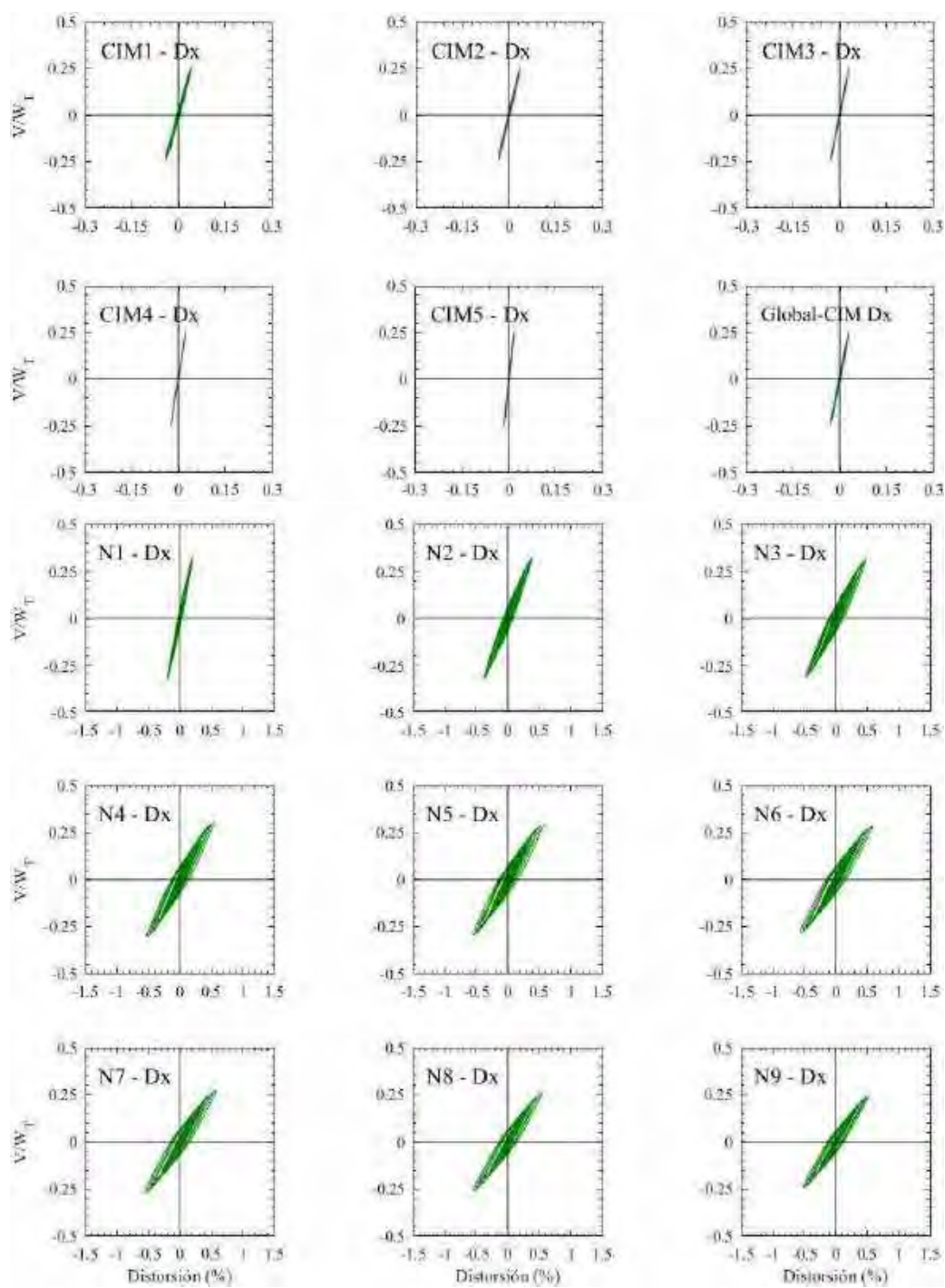


Figura H.160. Ciclos de histéresis de dispositivos BRB, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.2.3 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x



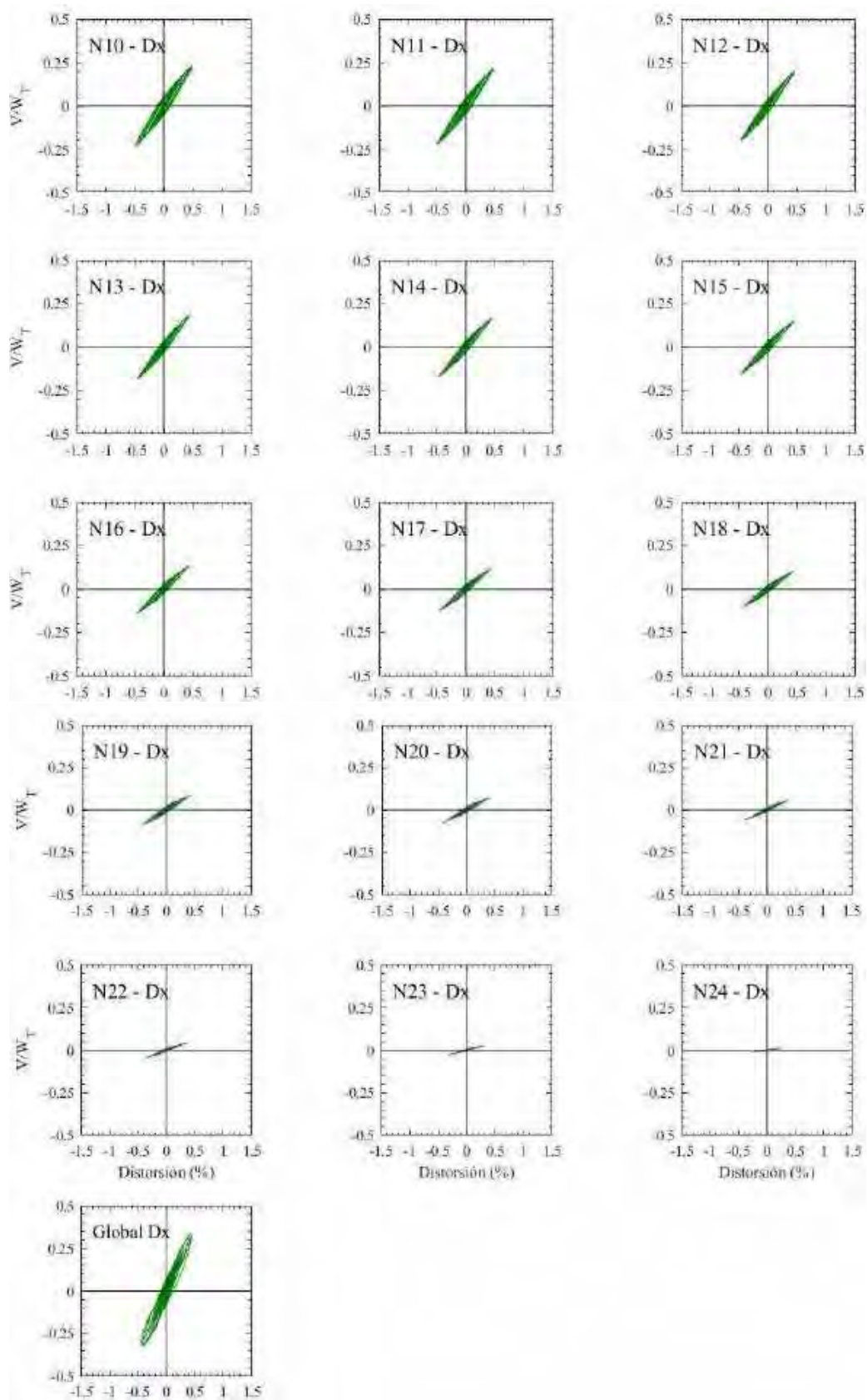
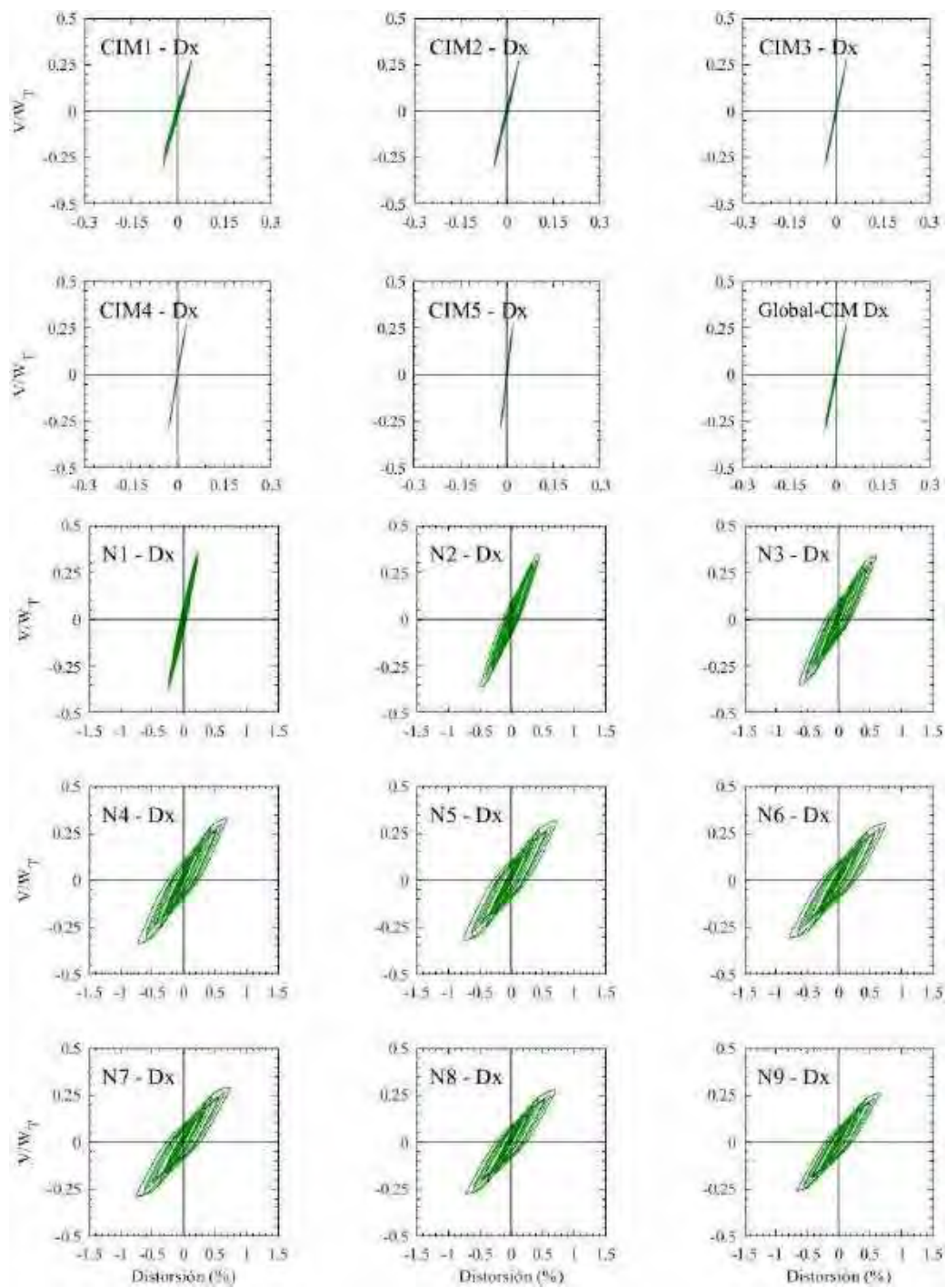


Figura H.161. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración TL08-A



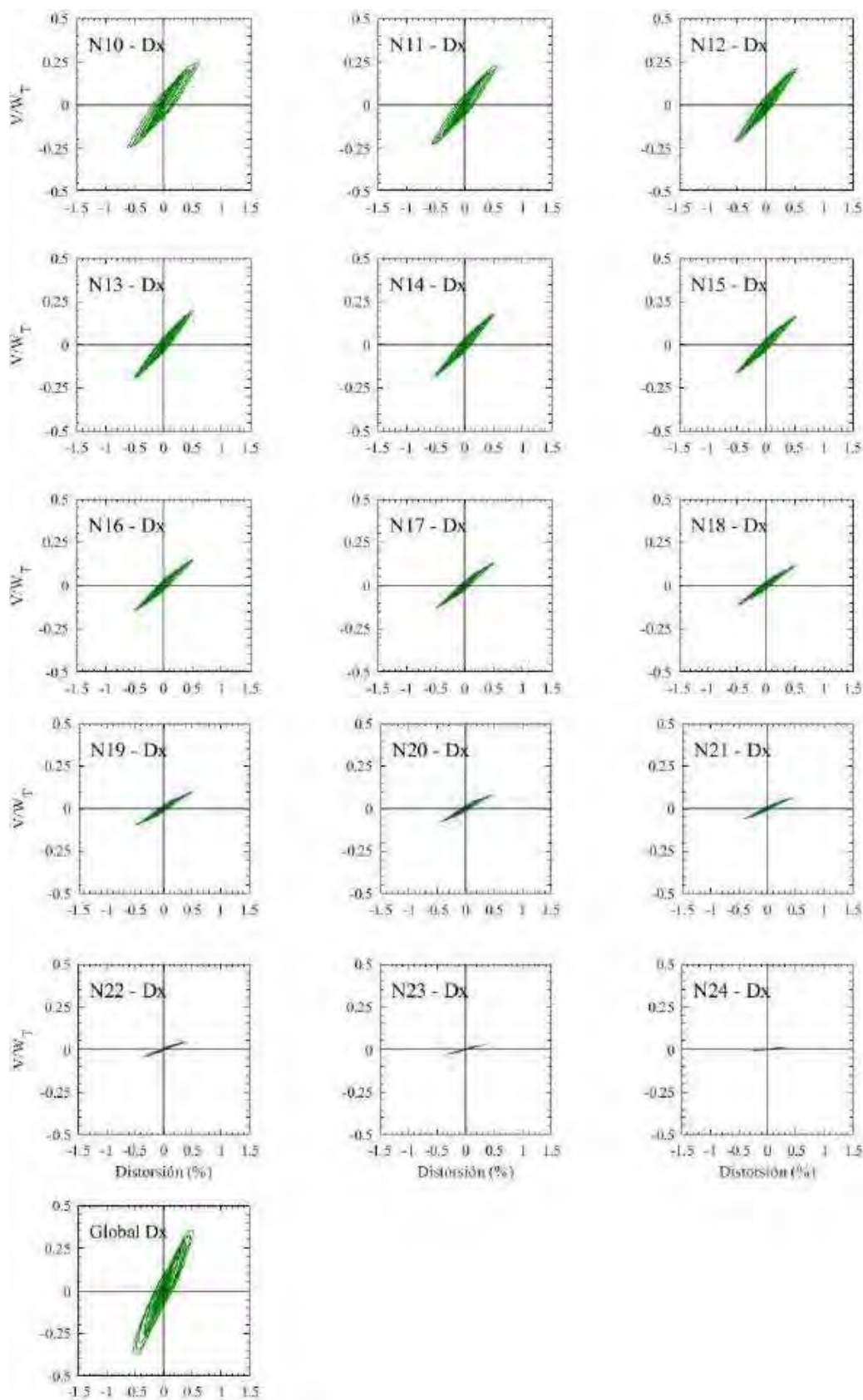
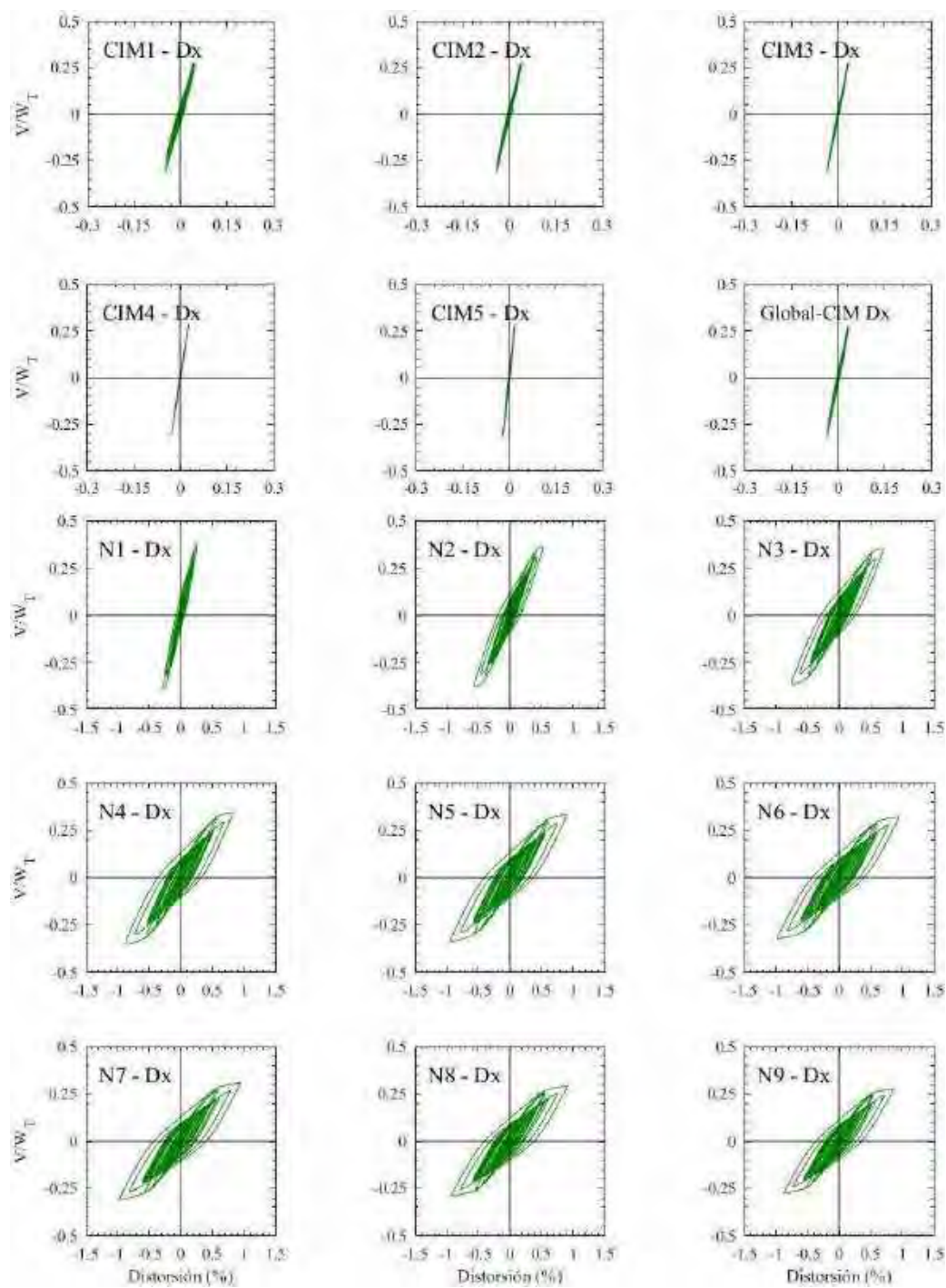


Figura H.162. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración TL08-B



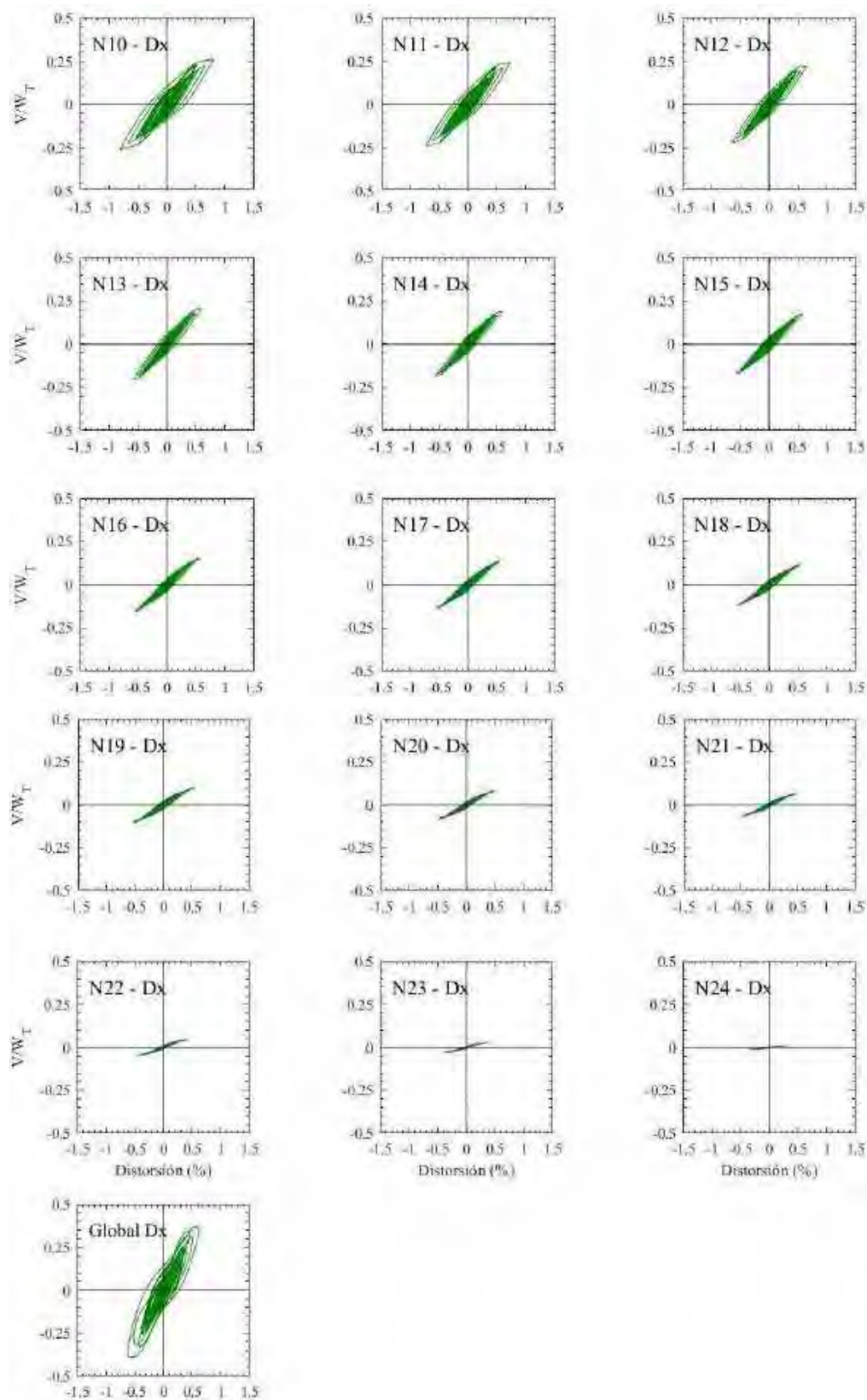
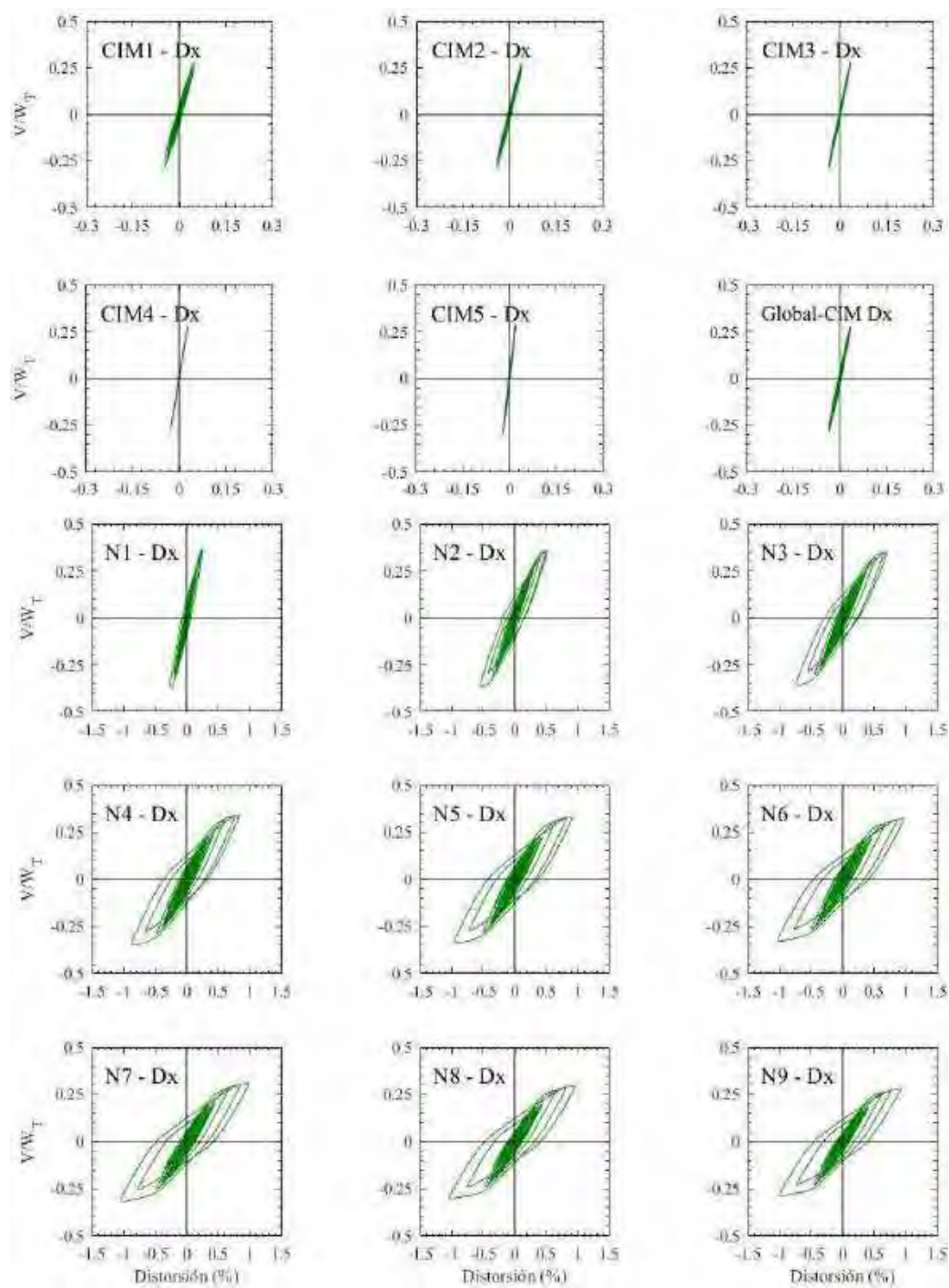


Figura H.163. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección x, registros de aceleración CJ03-A



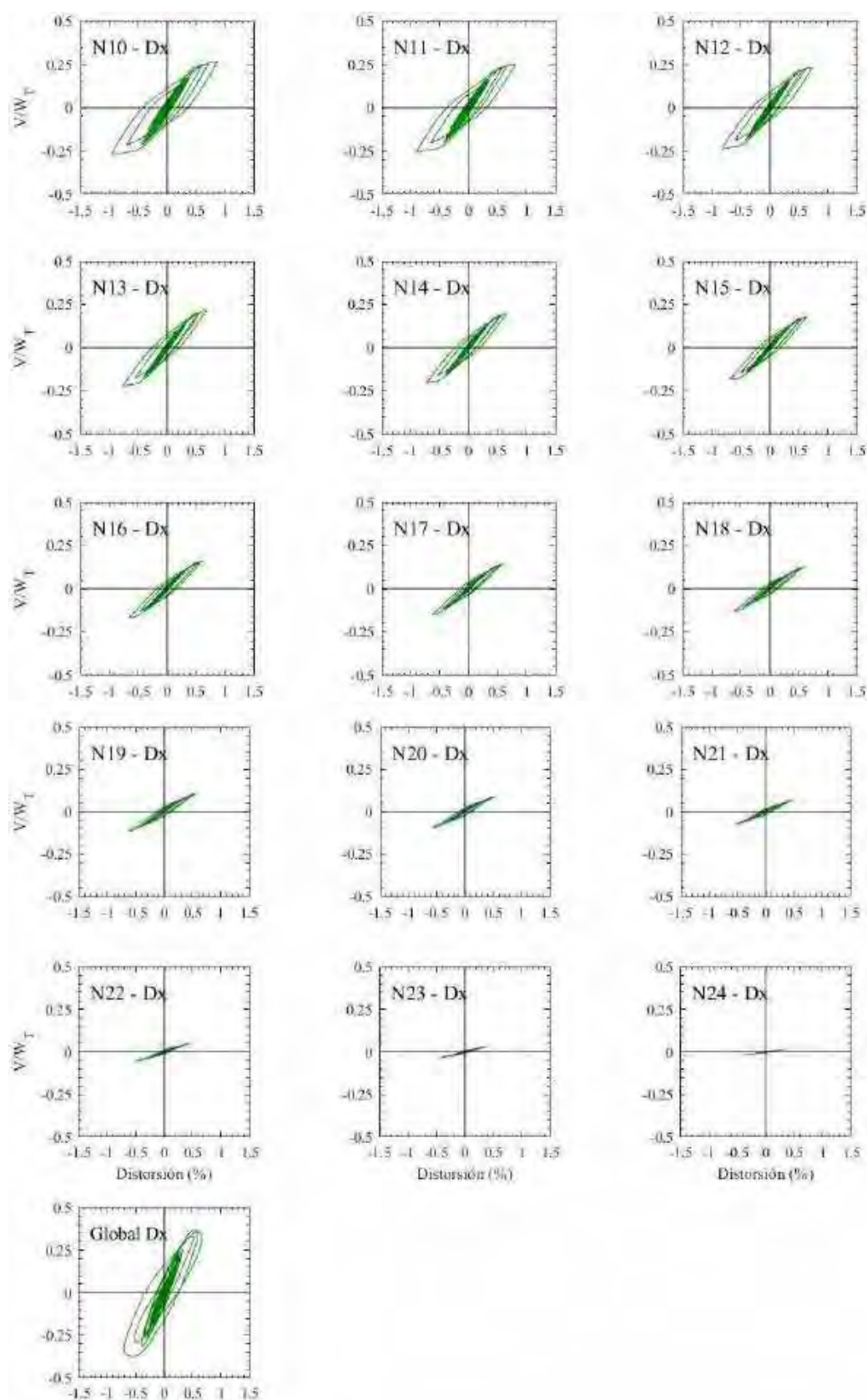
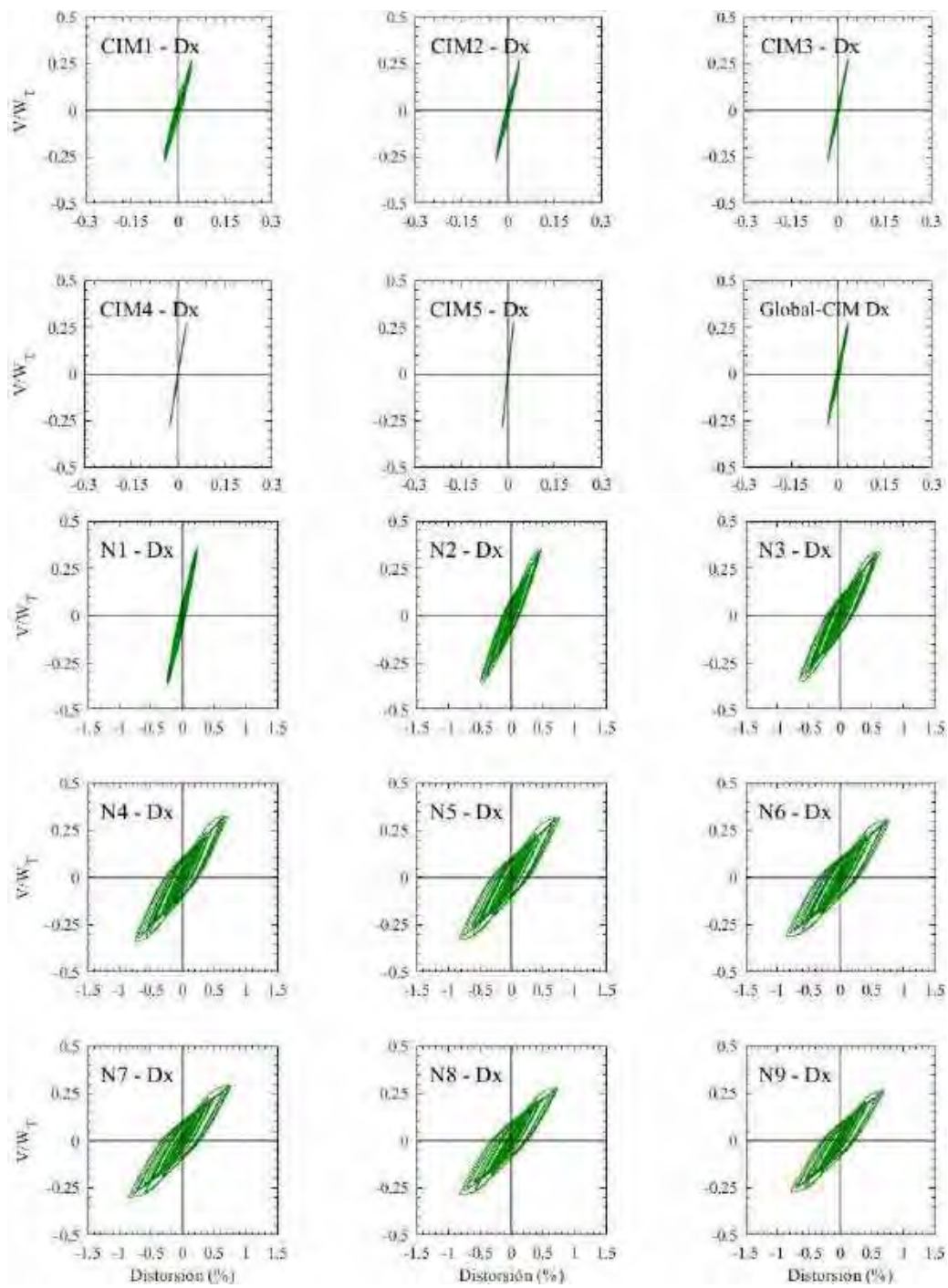


Figura H.164. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección x , registros de aceleración CJ03-B



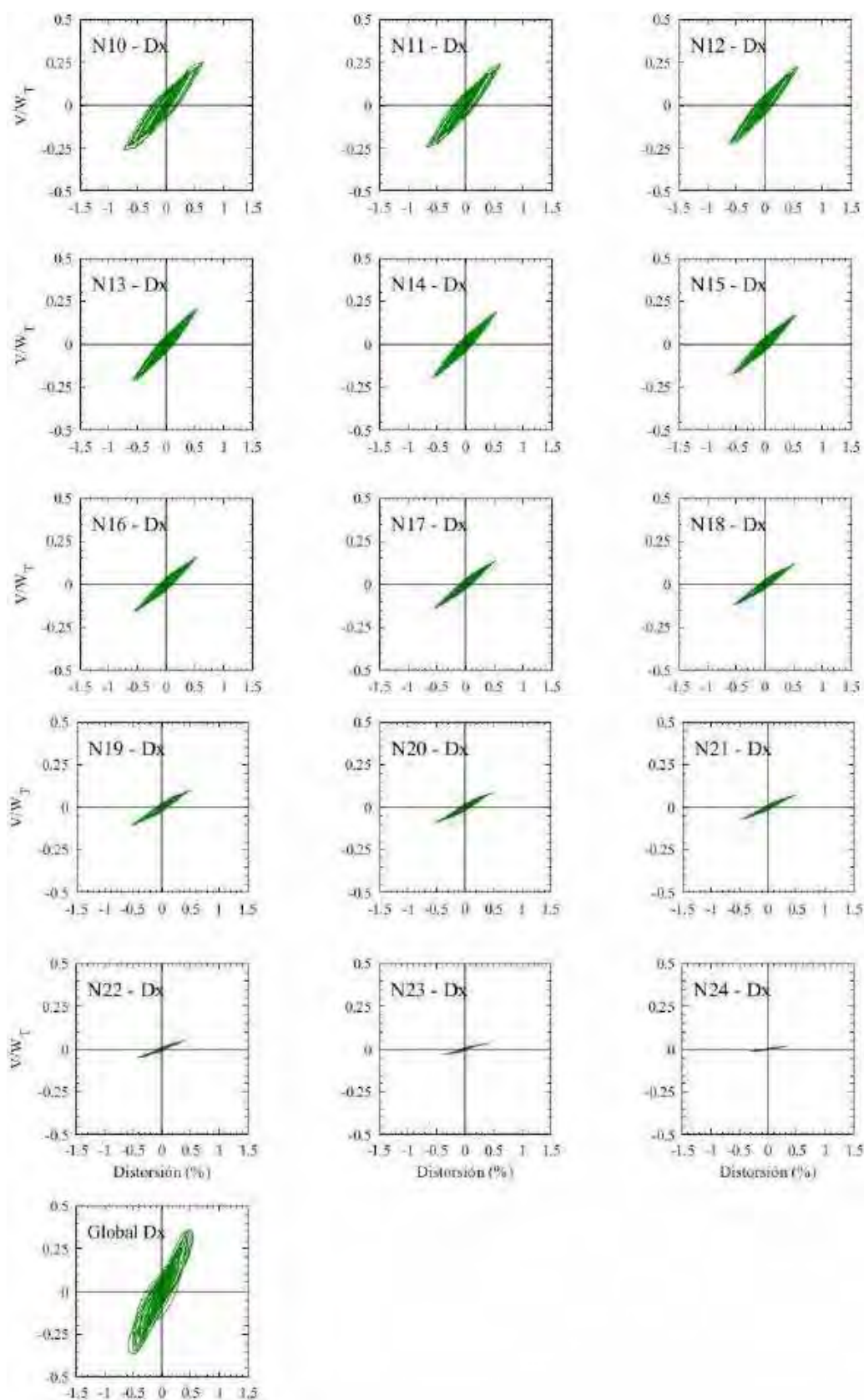
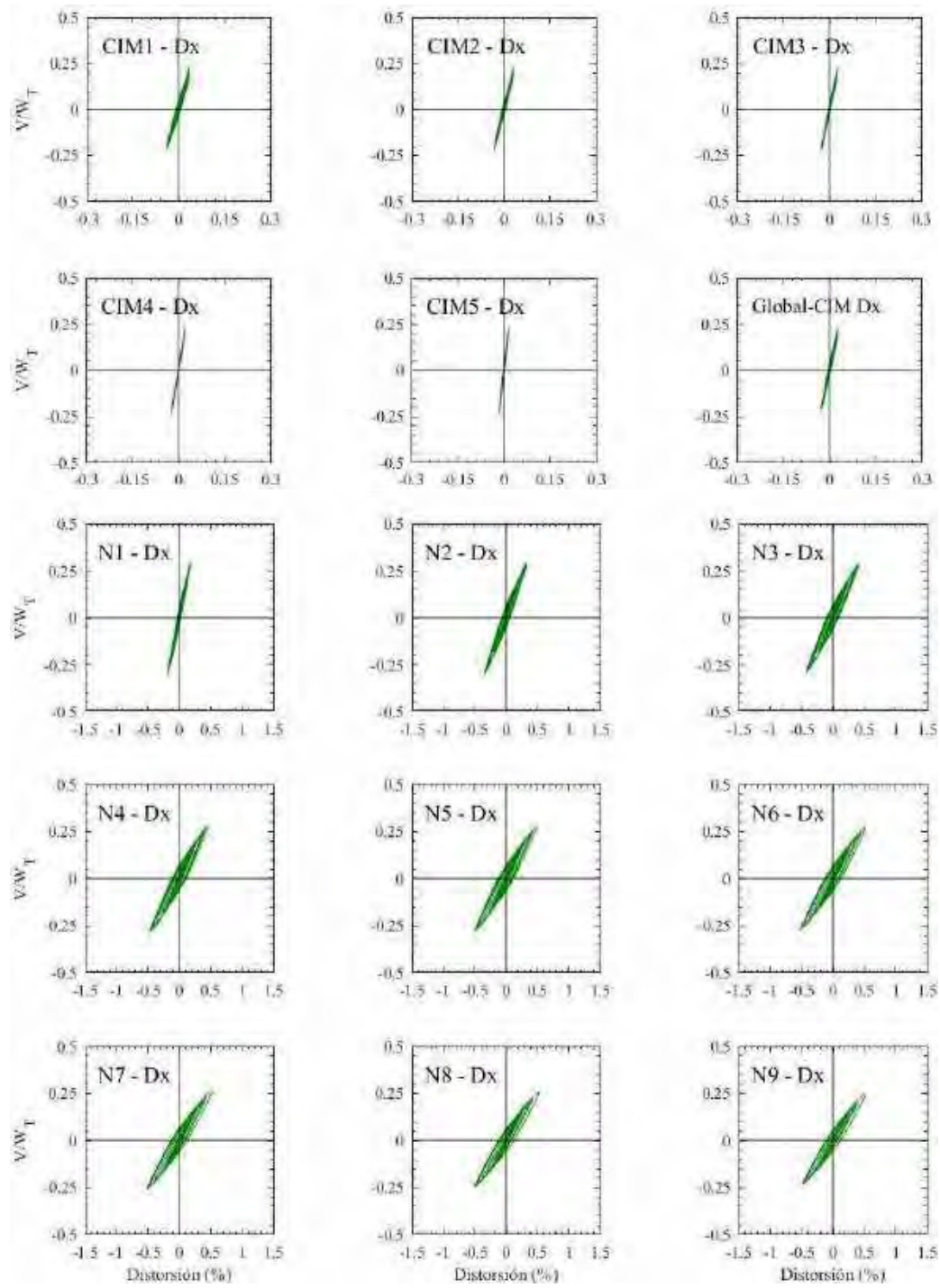


Figura H.165. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección x, registros de aceleración ALAM85-A



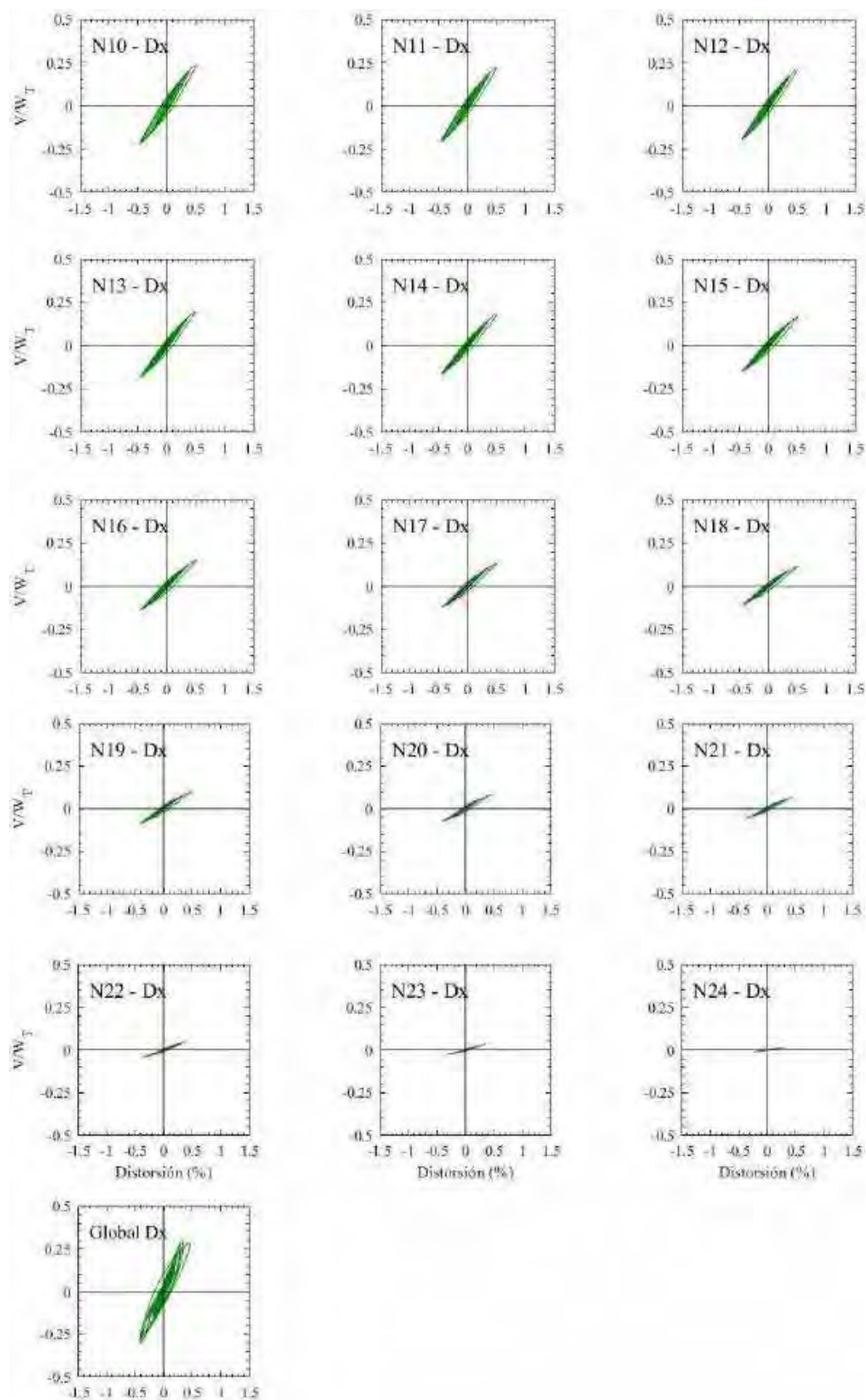
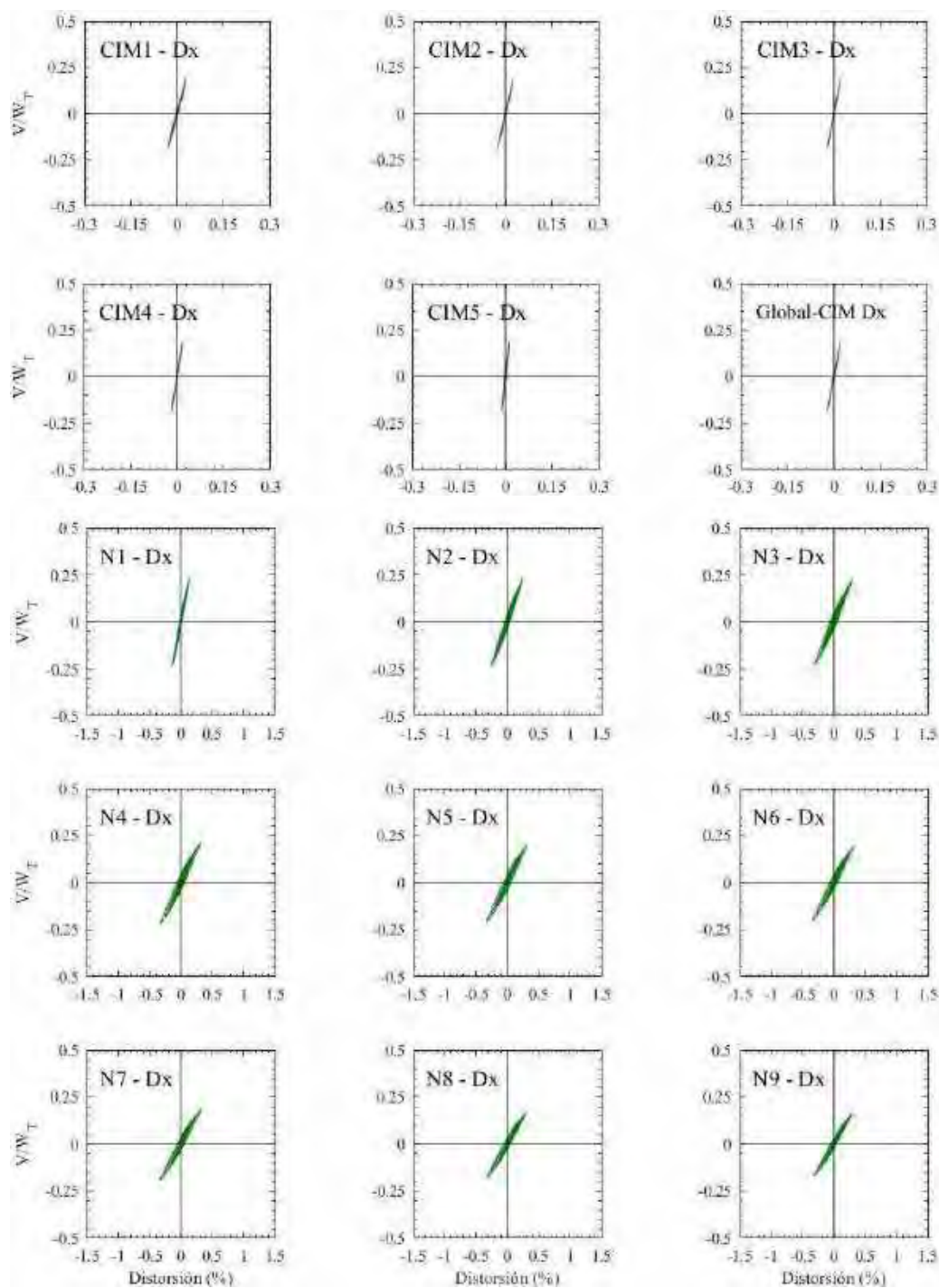


Figura H.166. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración ALAM85-B



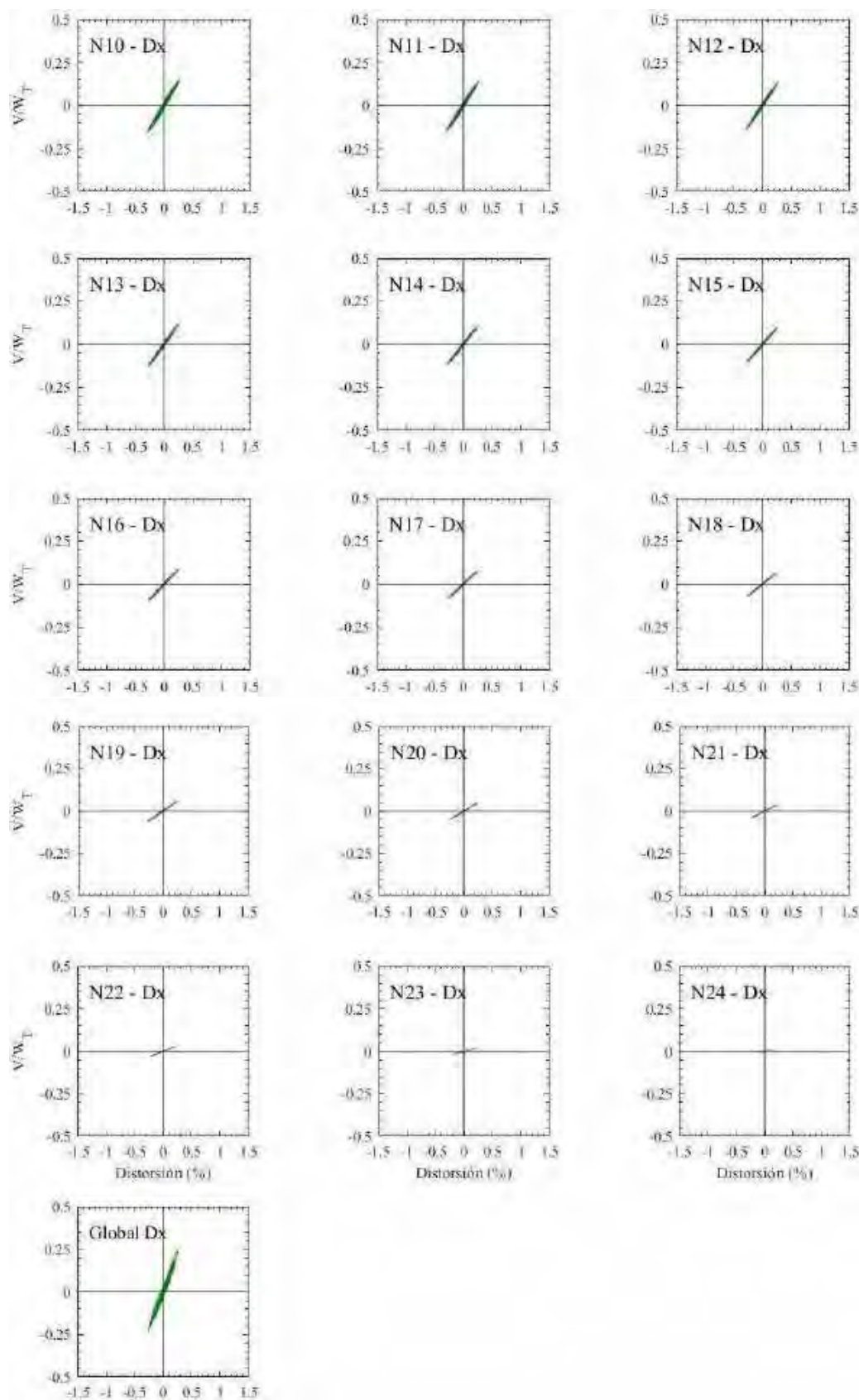
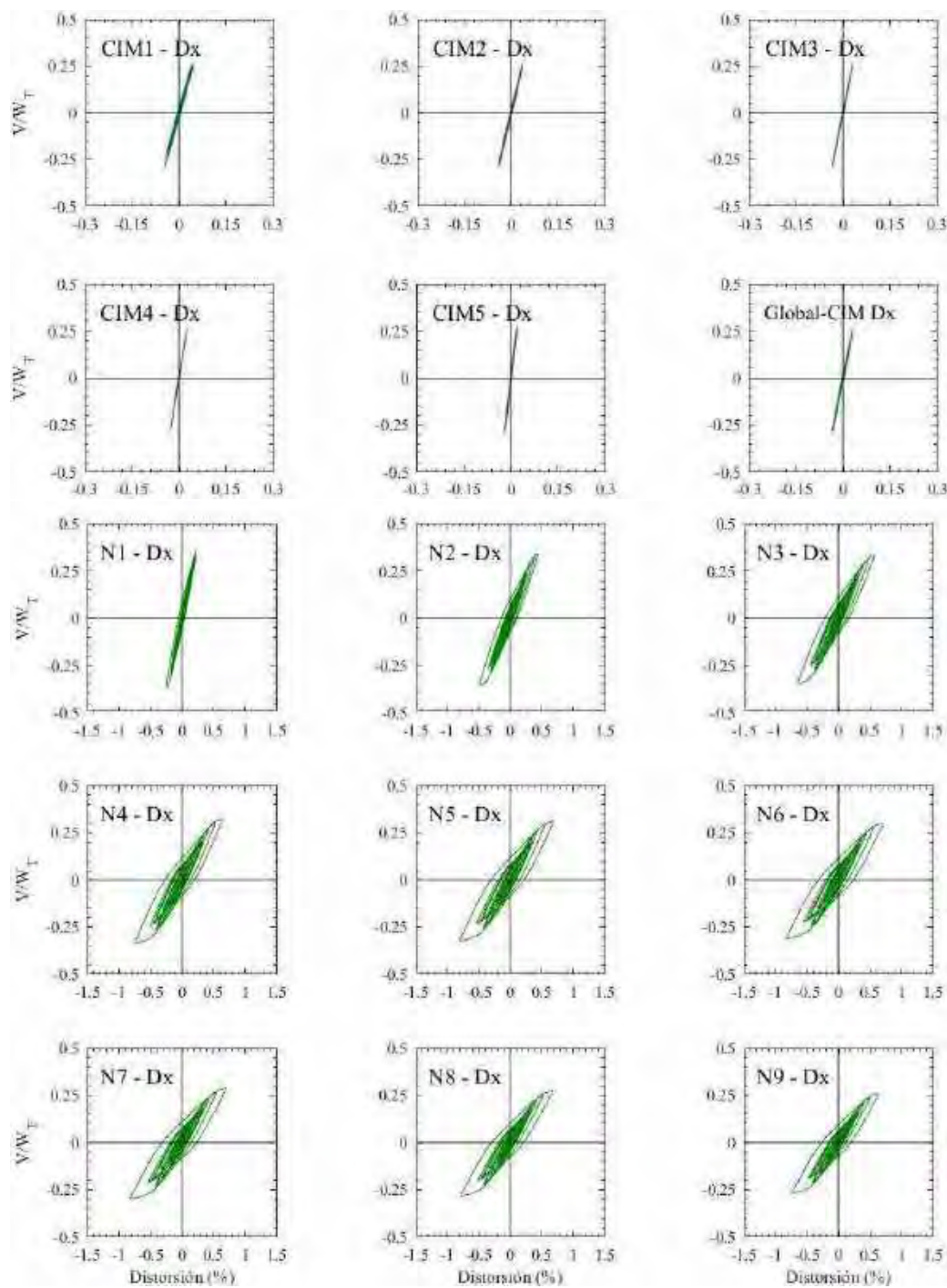


Figura H.167. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración TBOM-A (1985)



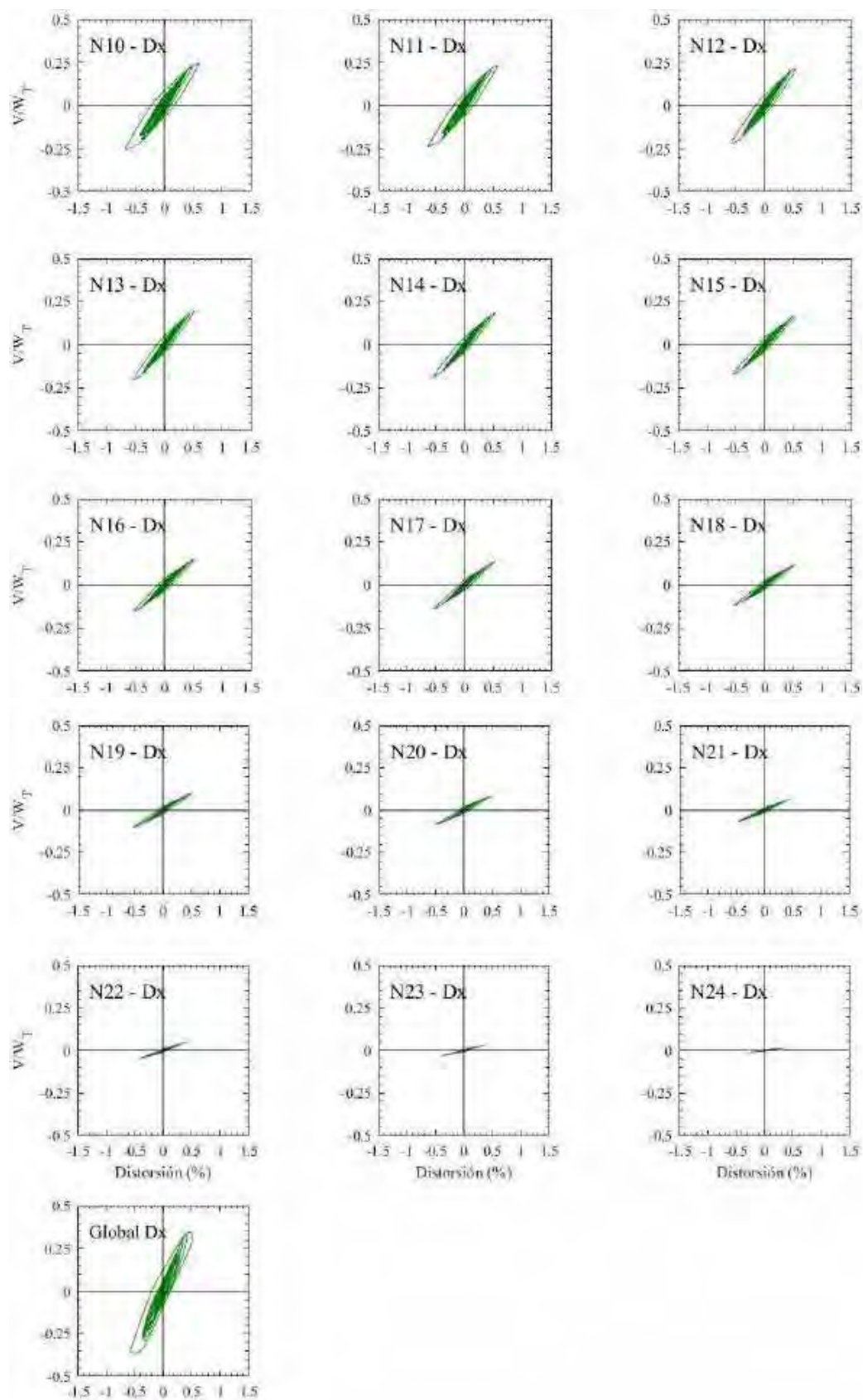
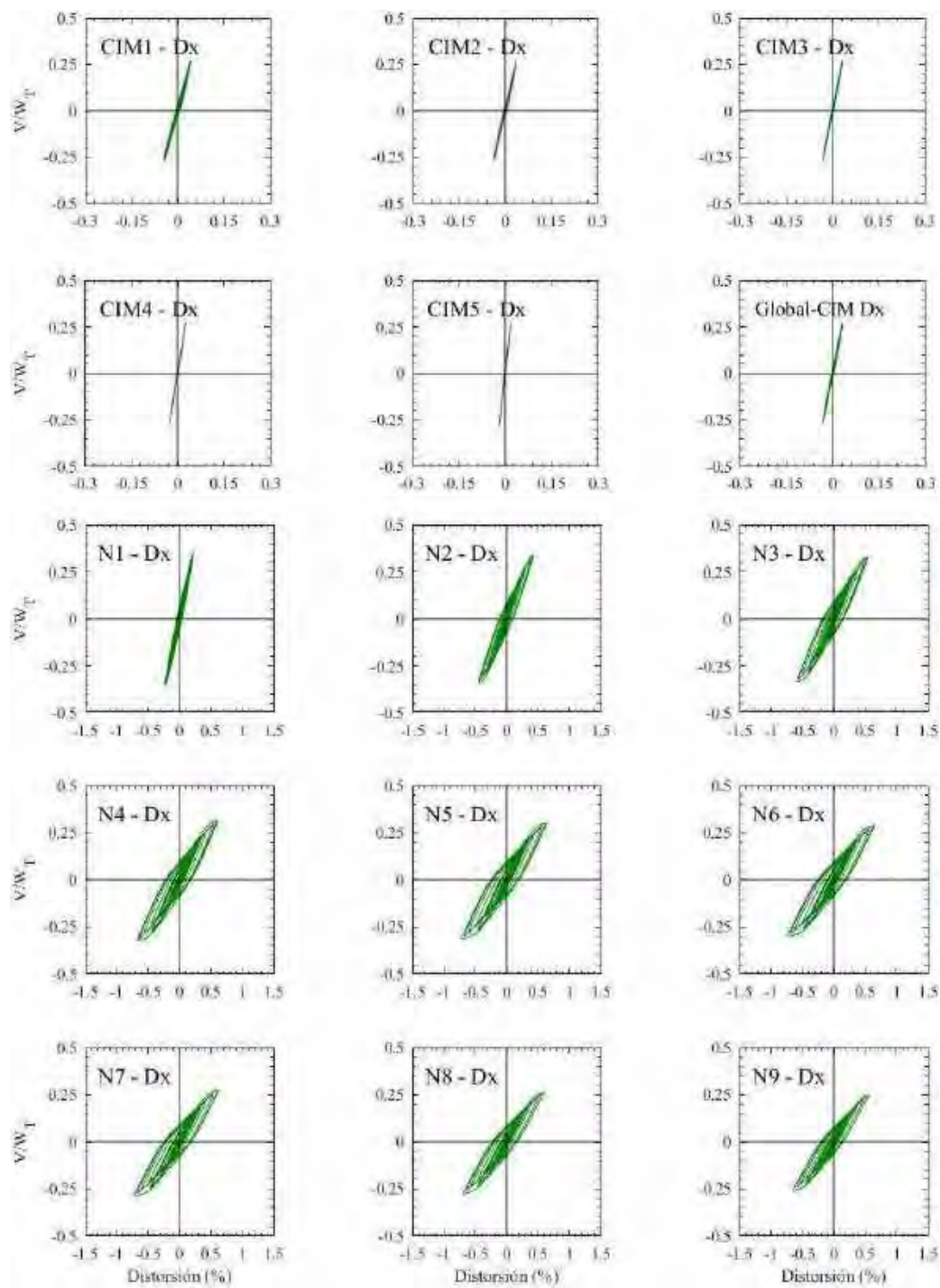


Figura H.168. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración TBOM –B (1985)



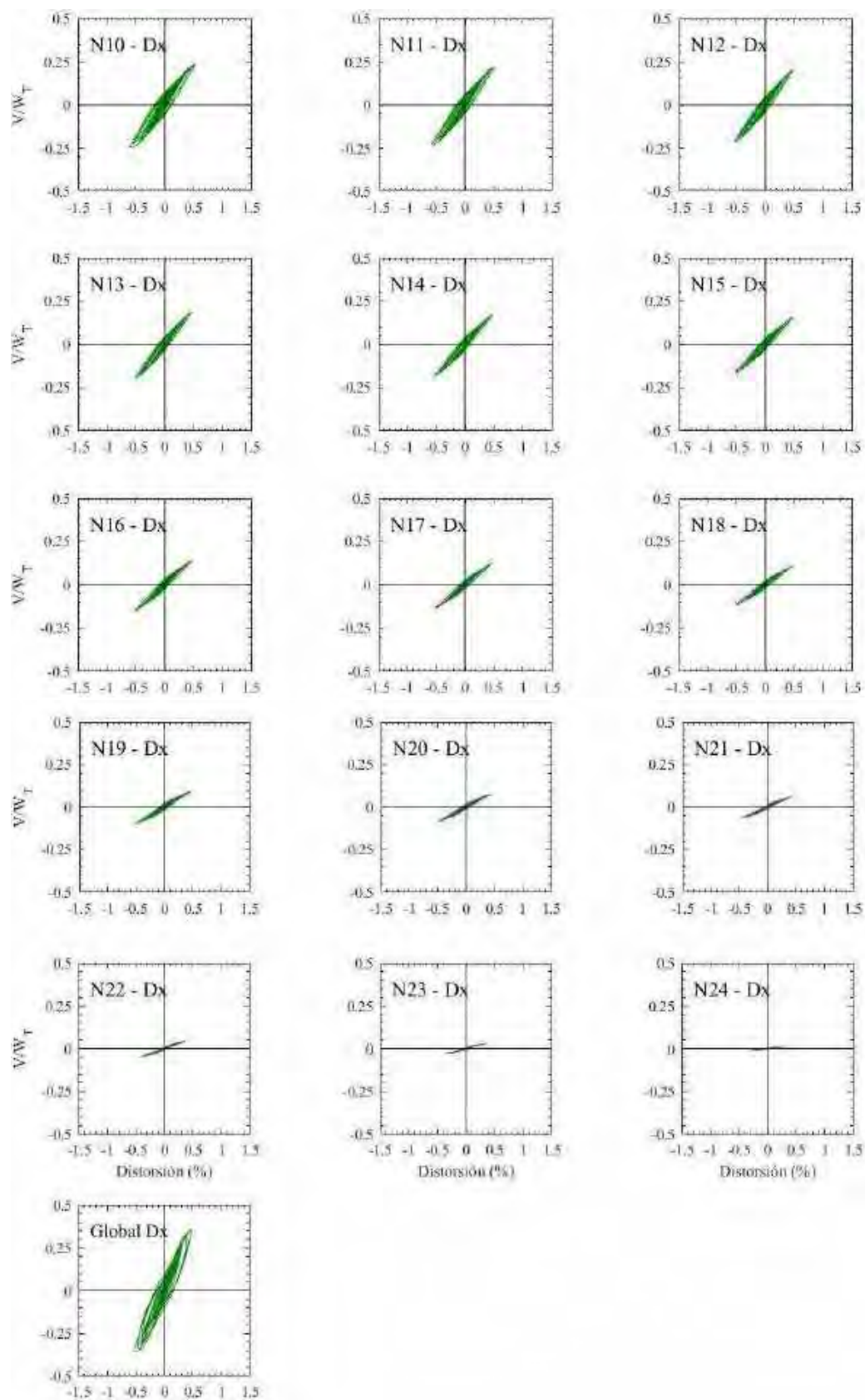
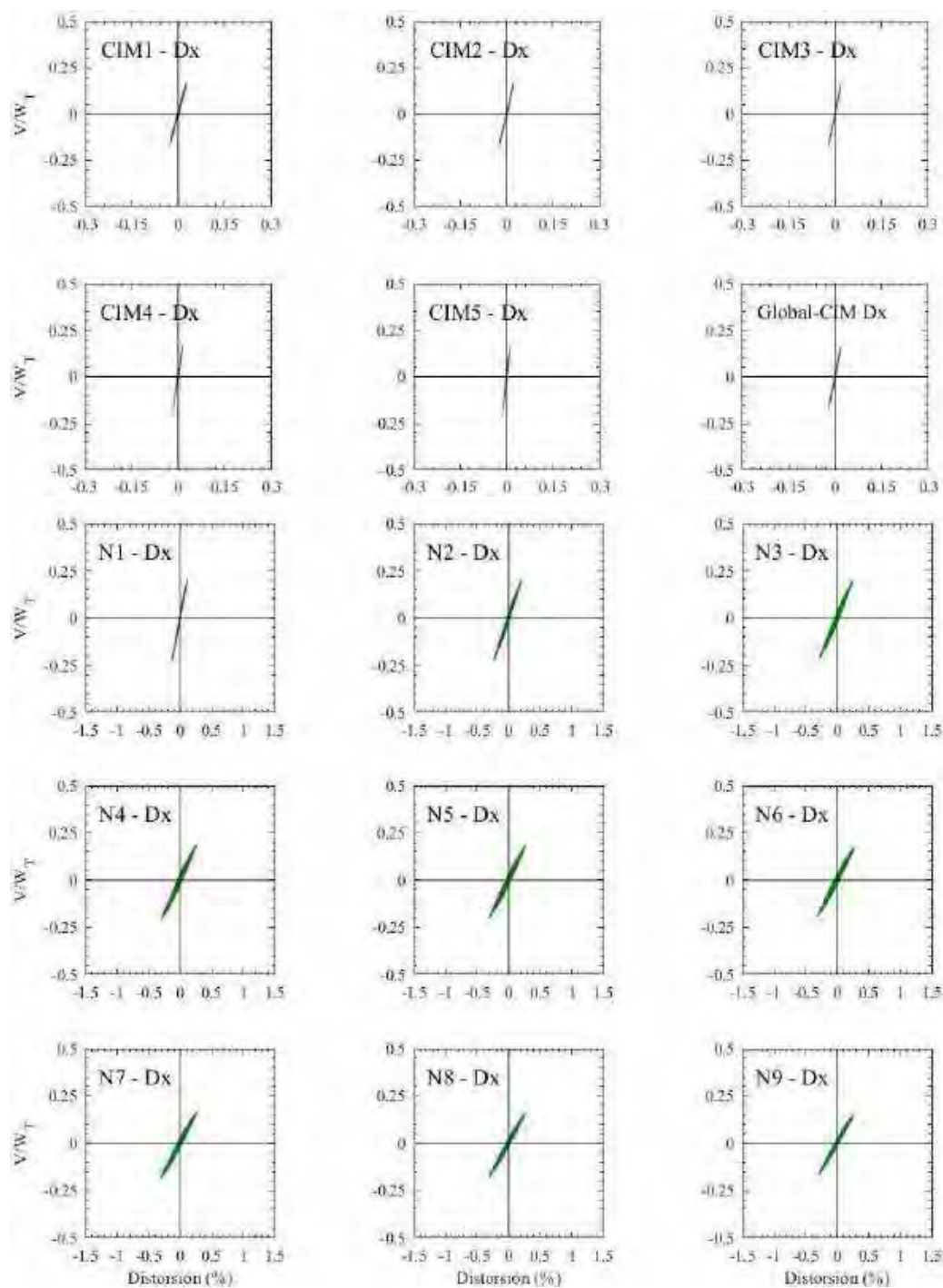


Figura H.169. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración SCT185-A (1985)



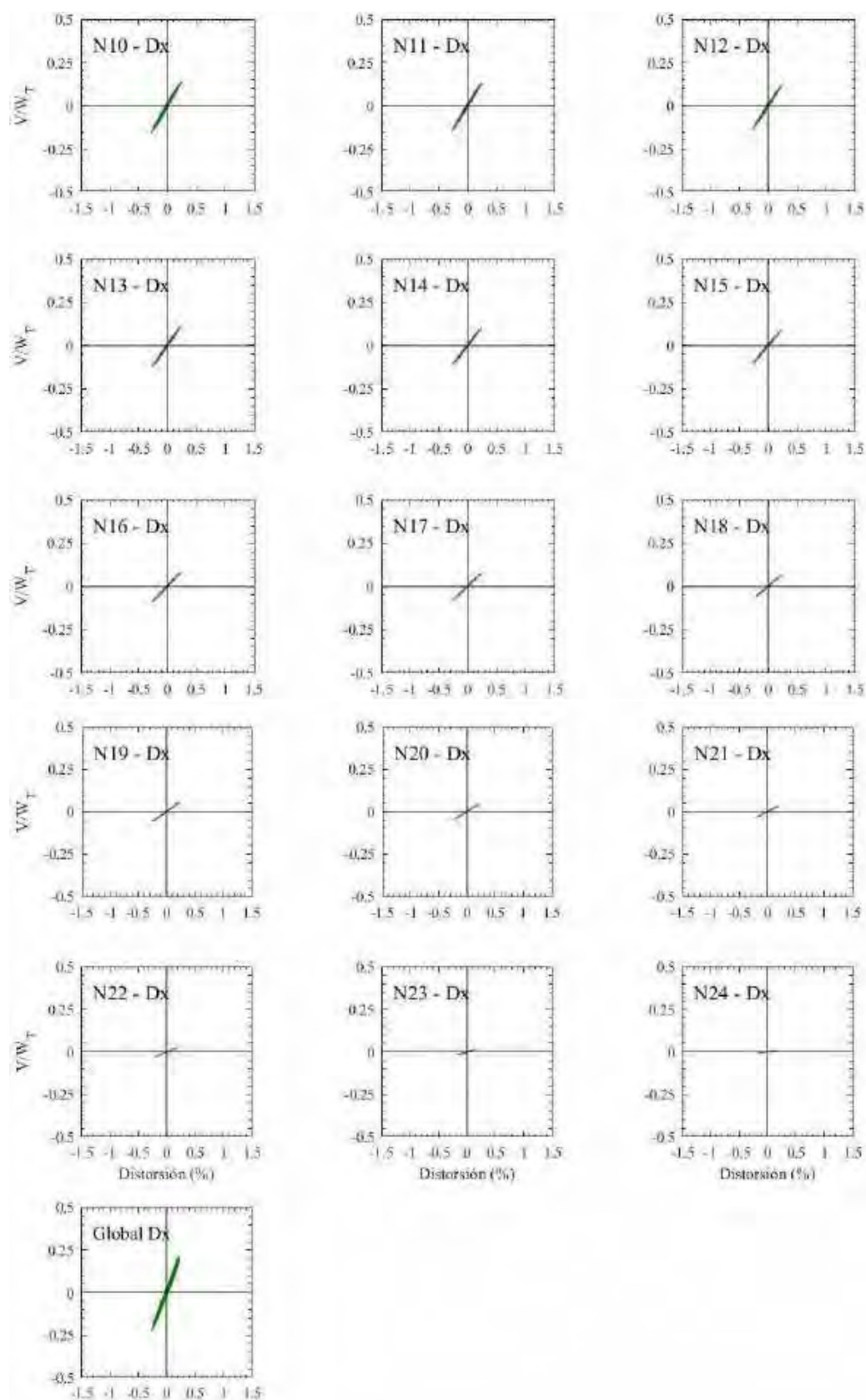
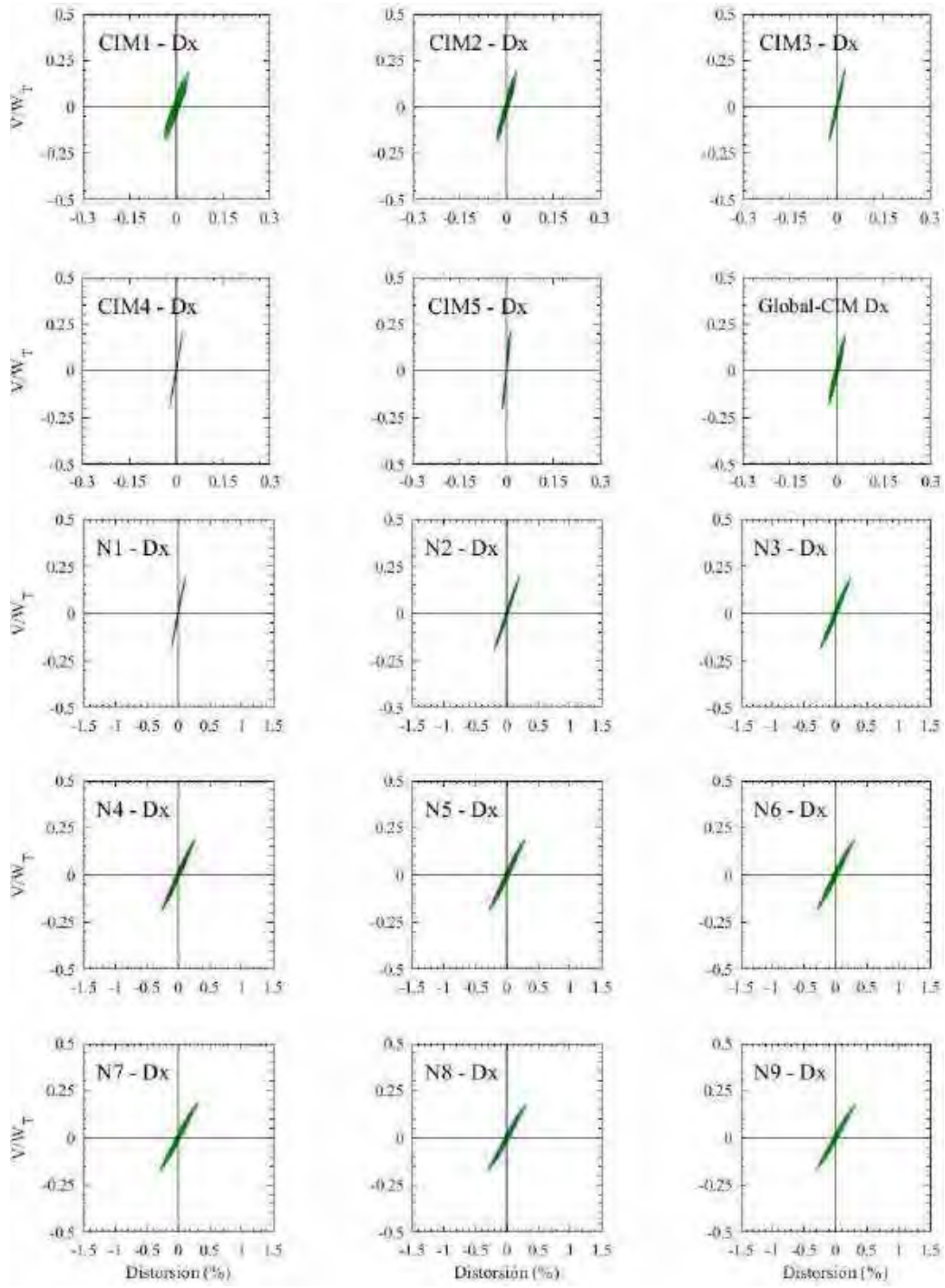


Figura H.170. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración SCT185-B (1985)



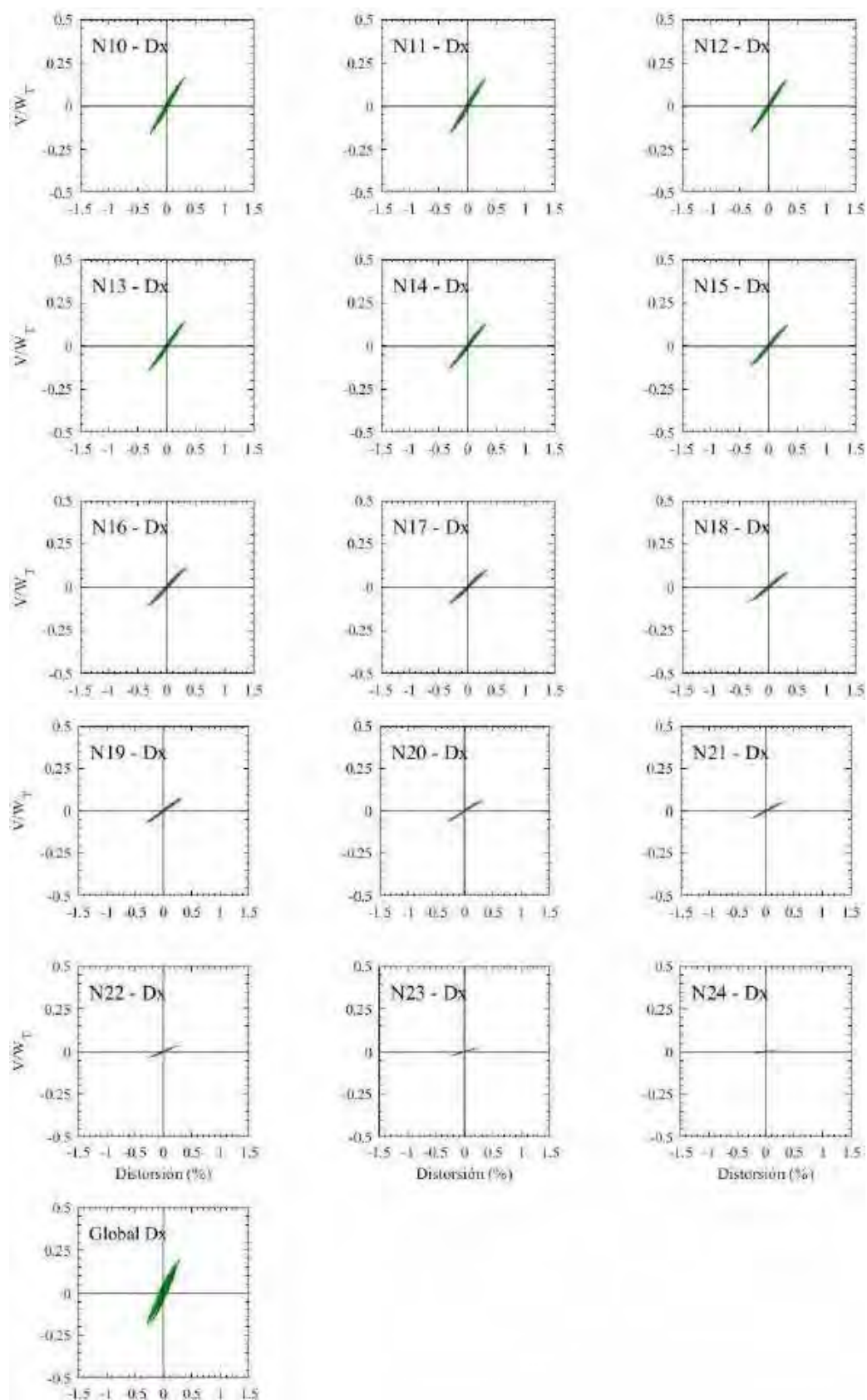
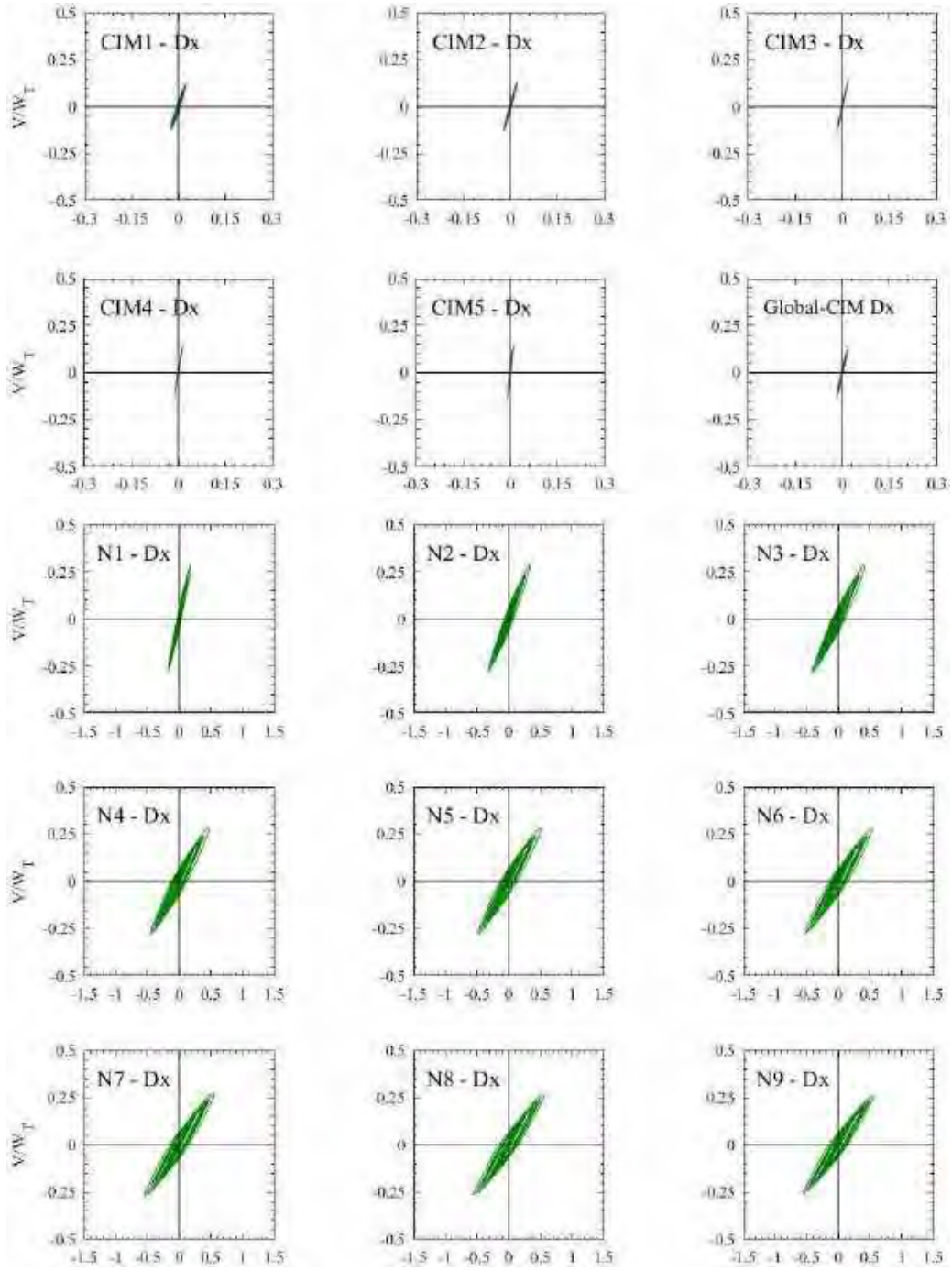


Figura H.171. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración CH84-A (2017)



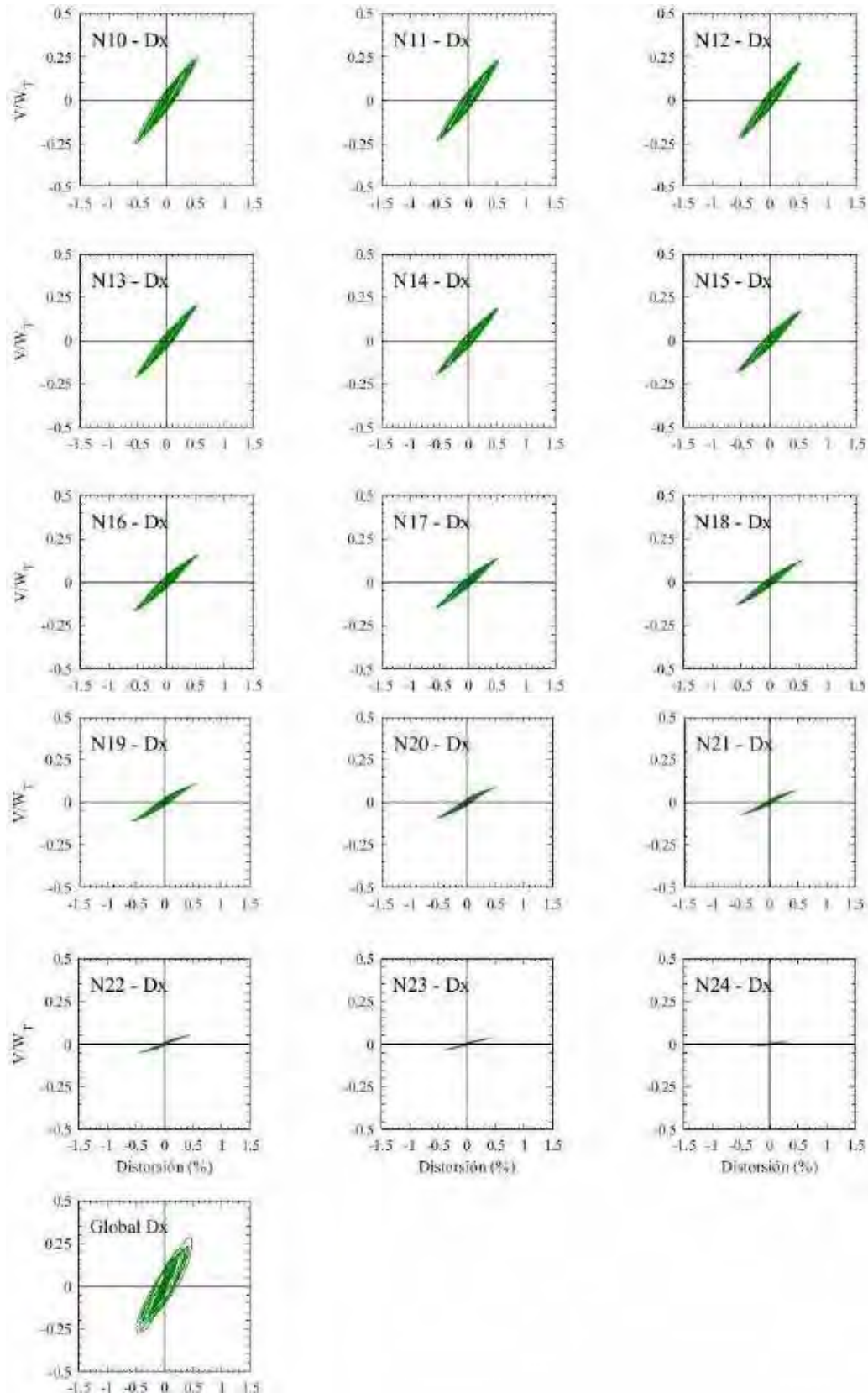
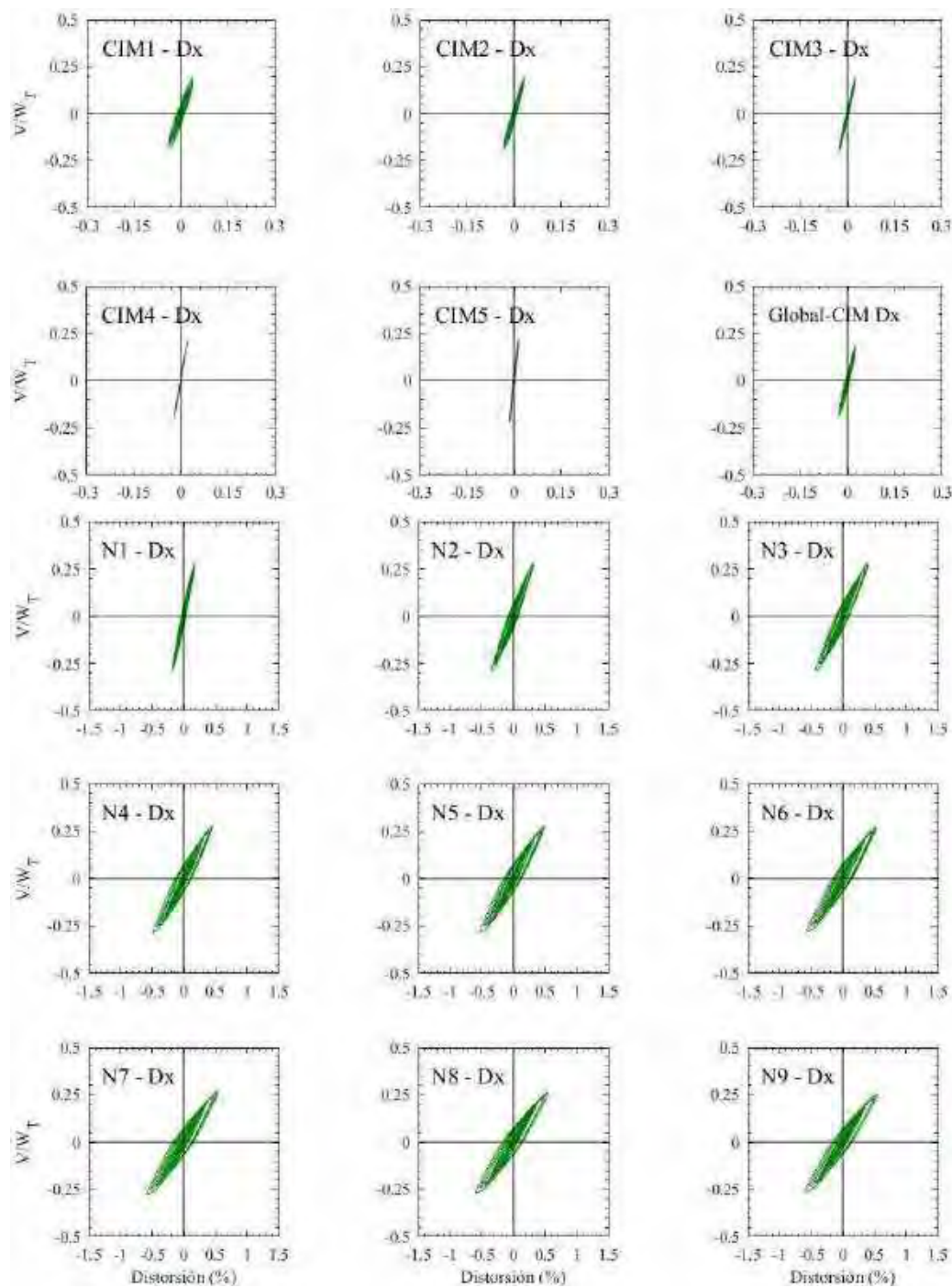


Figura H.172. Ciclos de histéresis de los entepisos en dirección x, registros de aceleración CH84-B (2017)



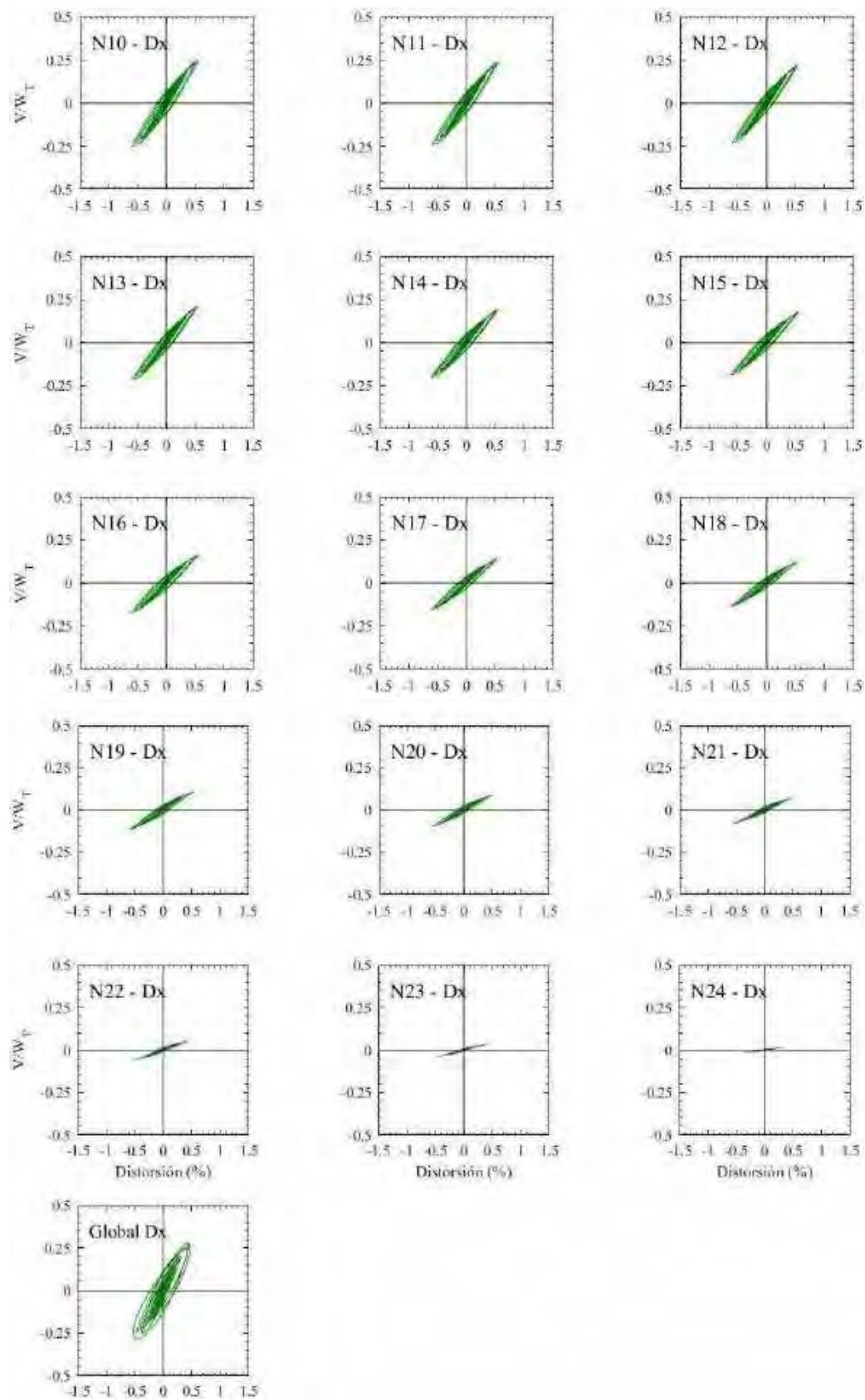
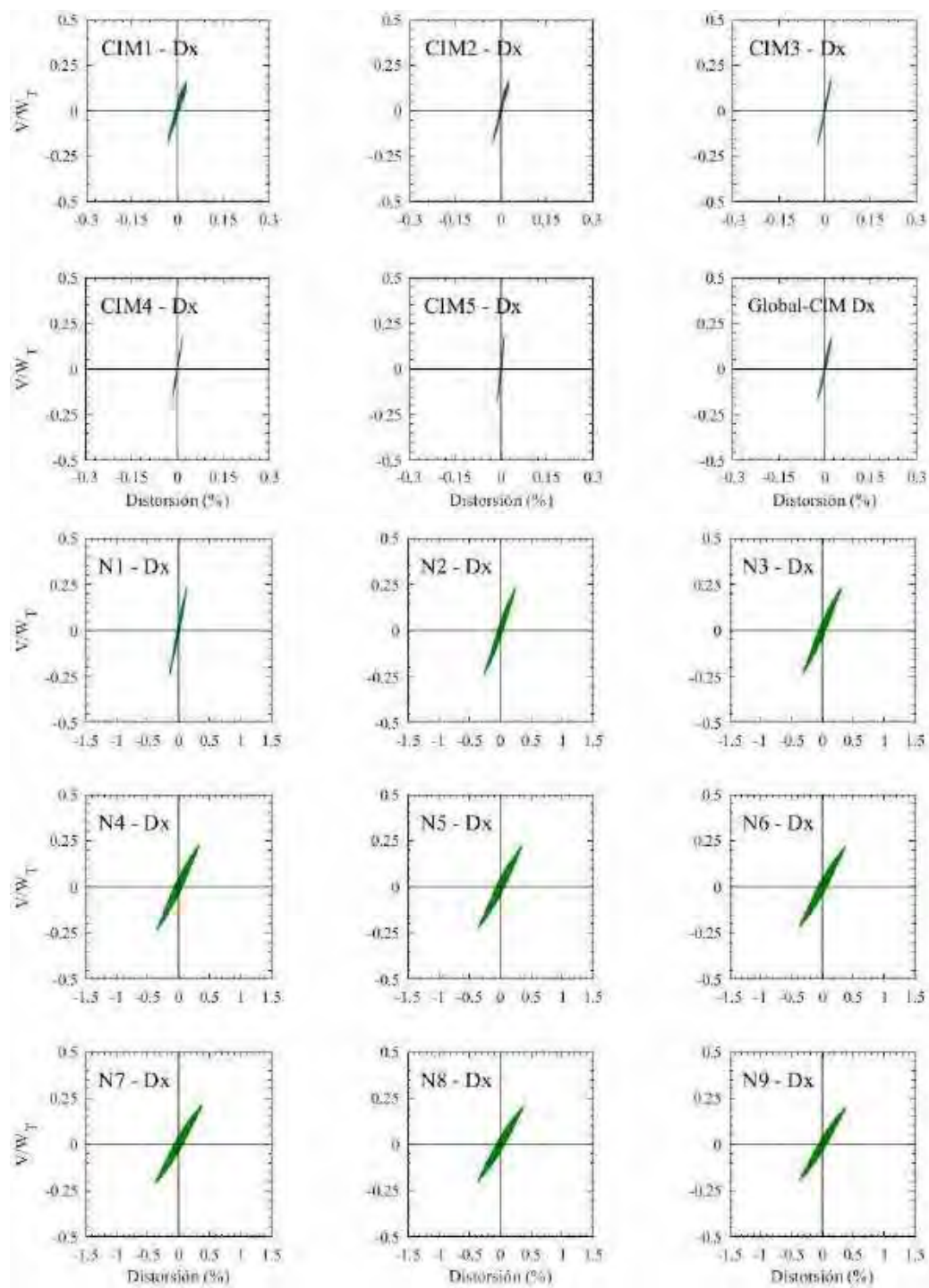


Figura H.173. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración MI15-A (2017)



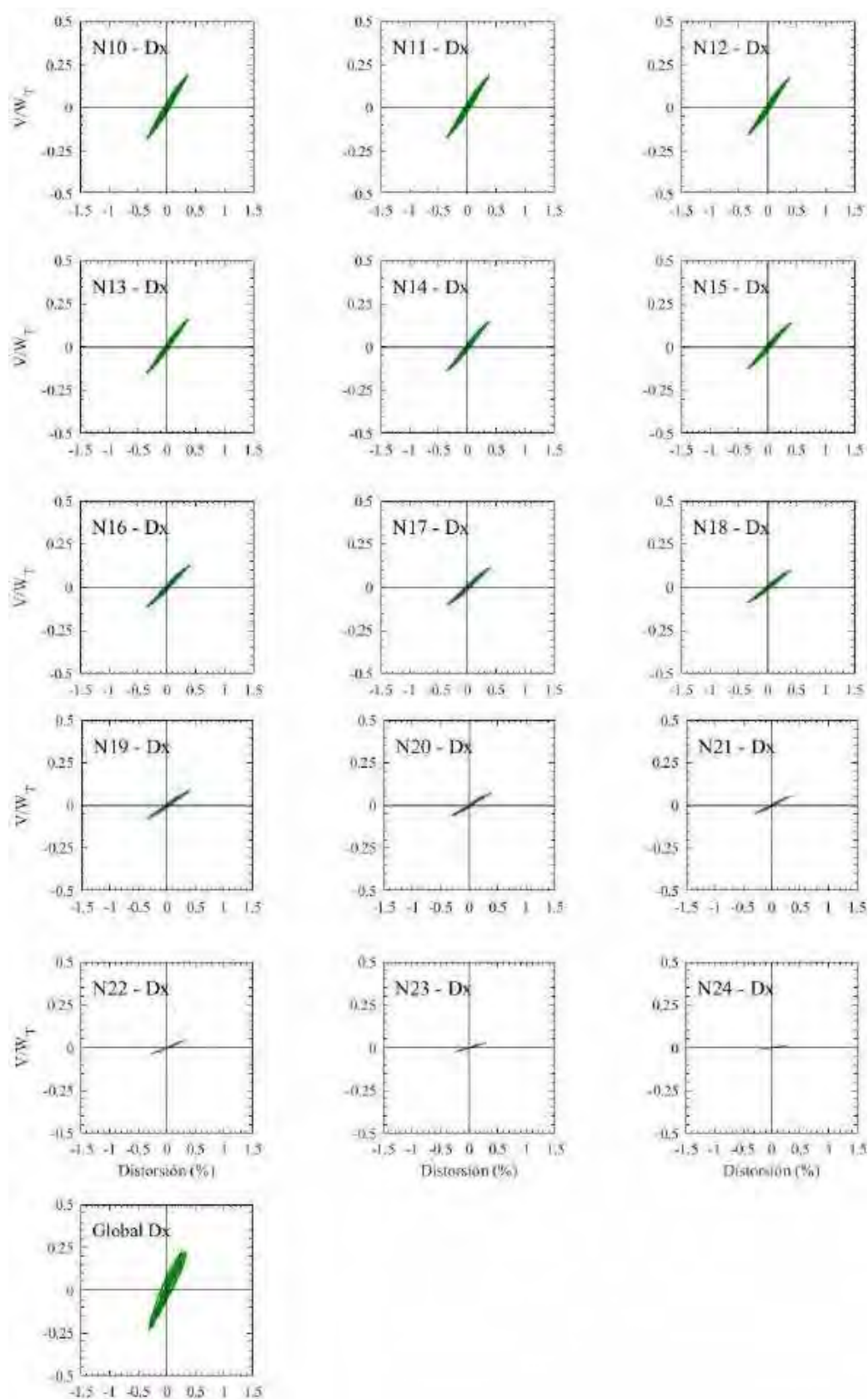
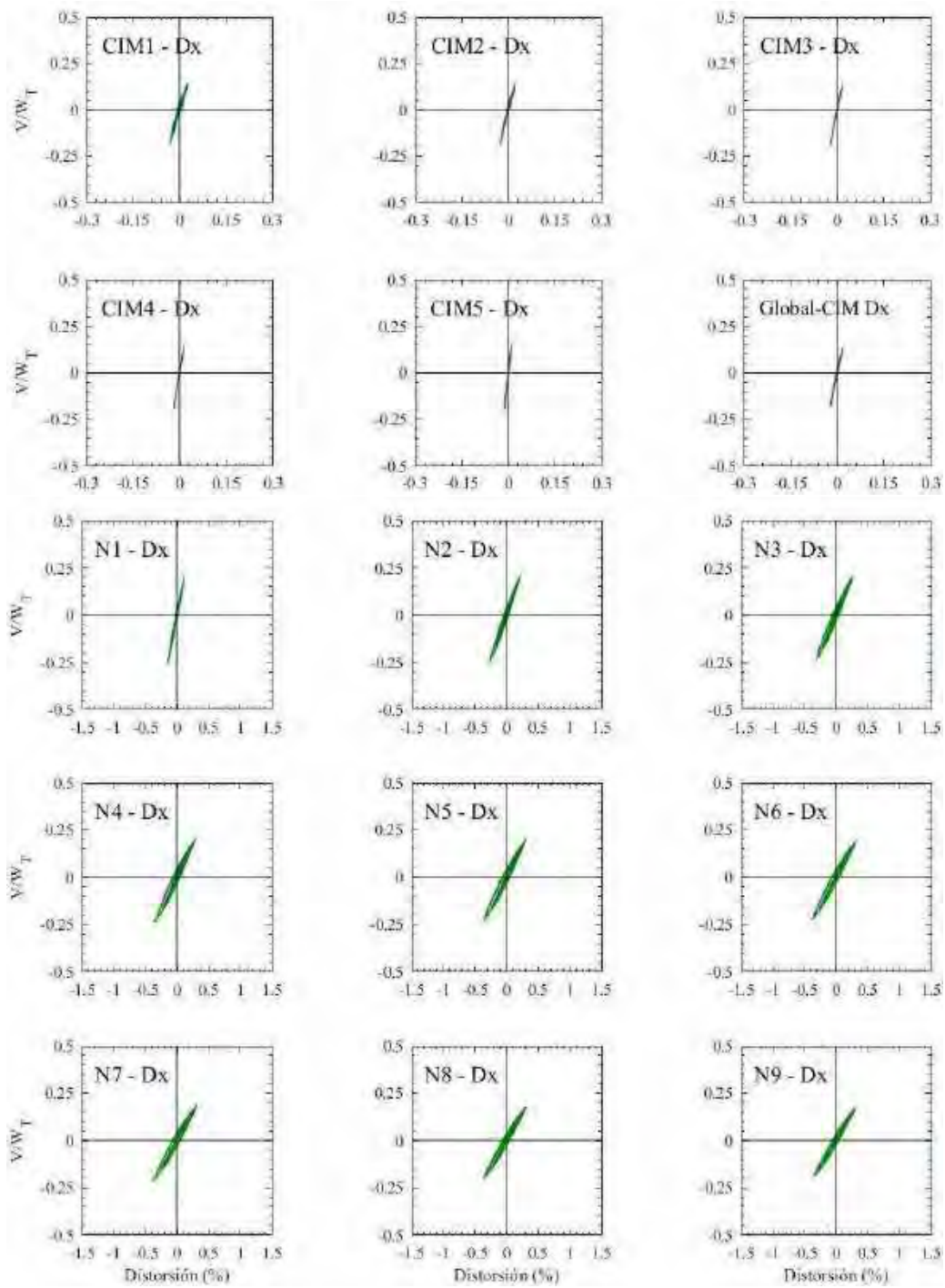


Figura H.174. Ciclos de histéresis de los entrapamientos en dirección x , registros de aceleración MI15-B (2017)



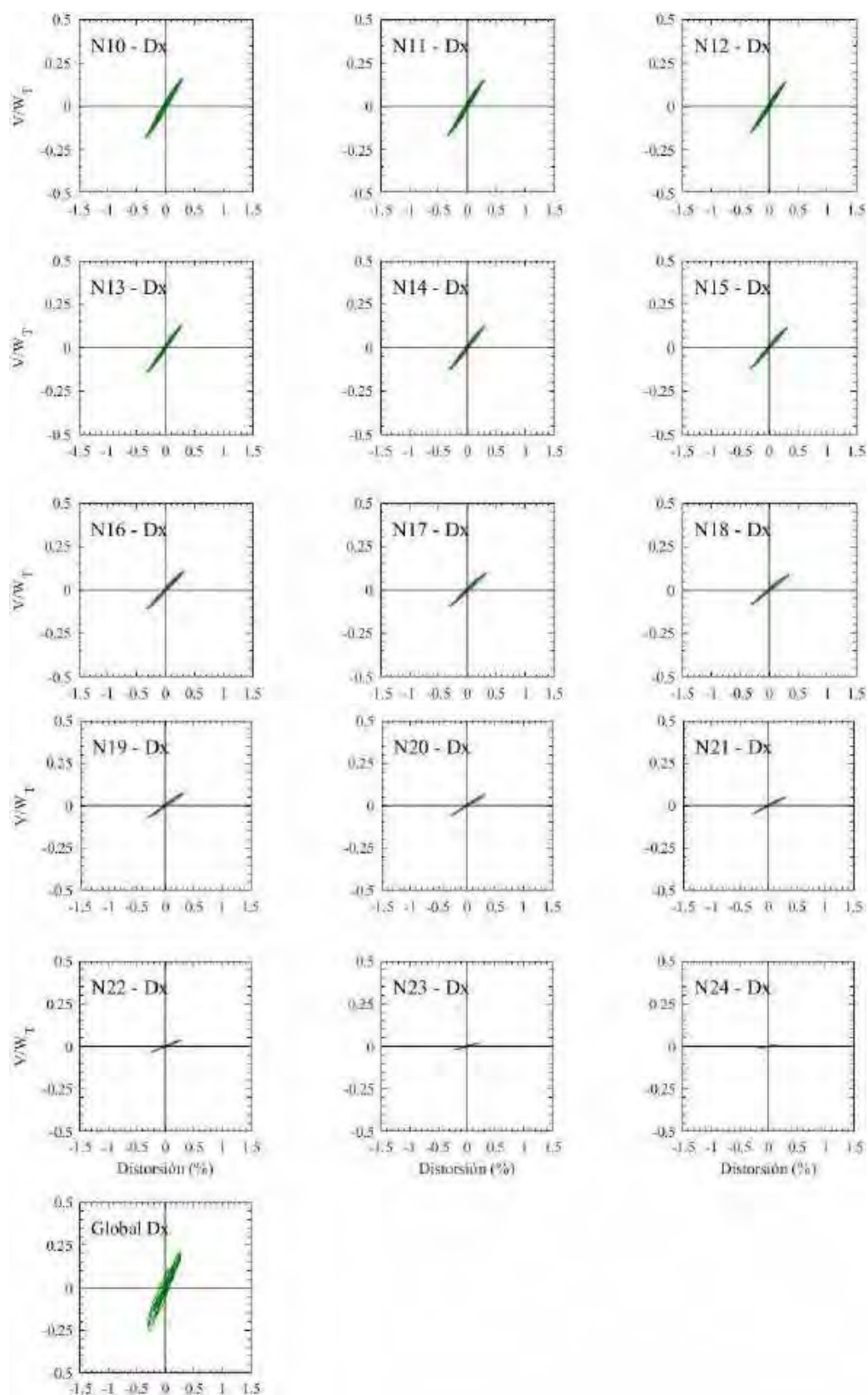
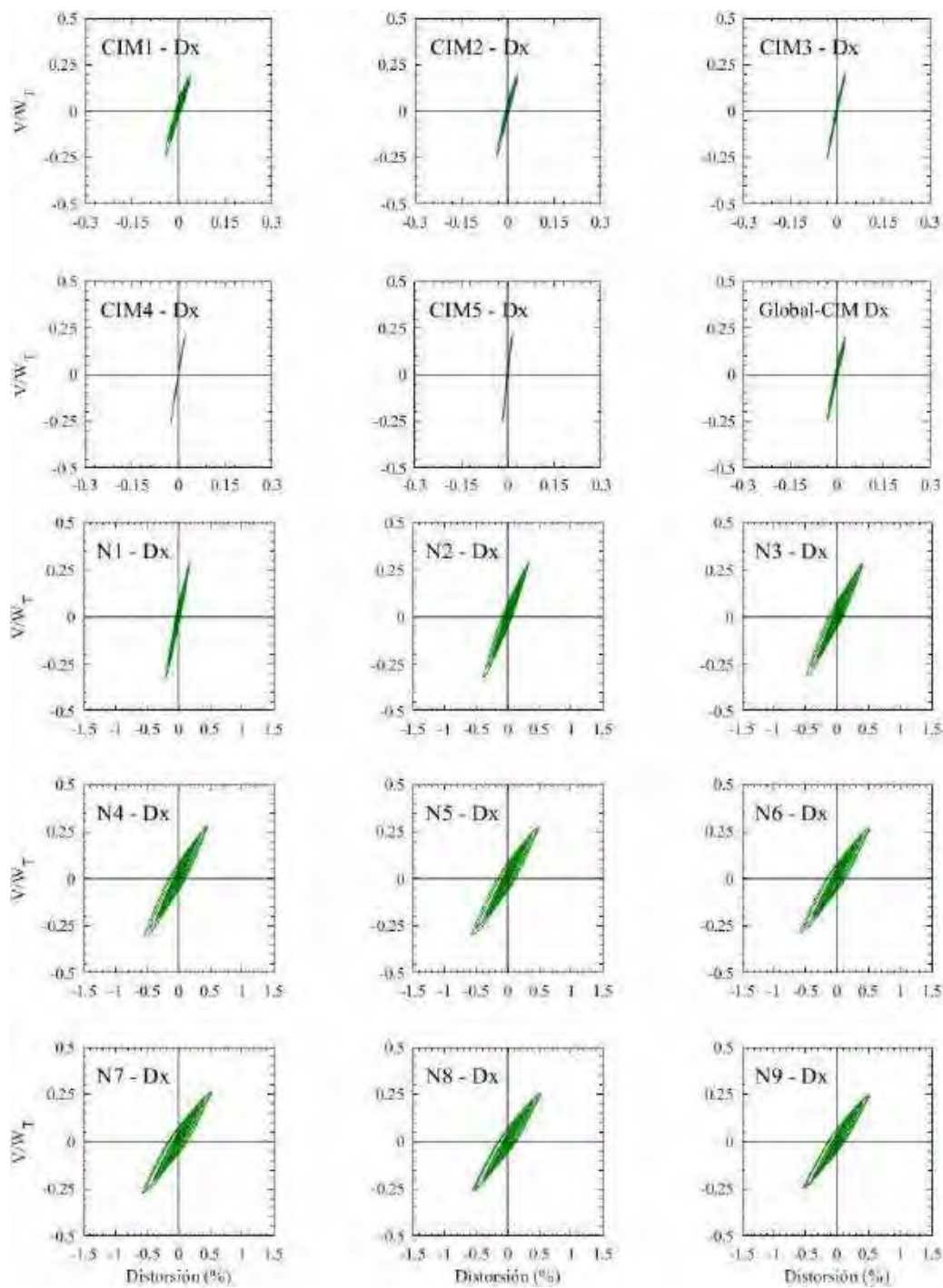


Figura H.175. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x, registros de aceleración XO36-A (2017)



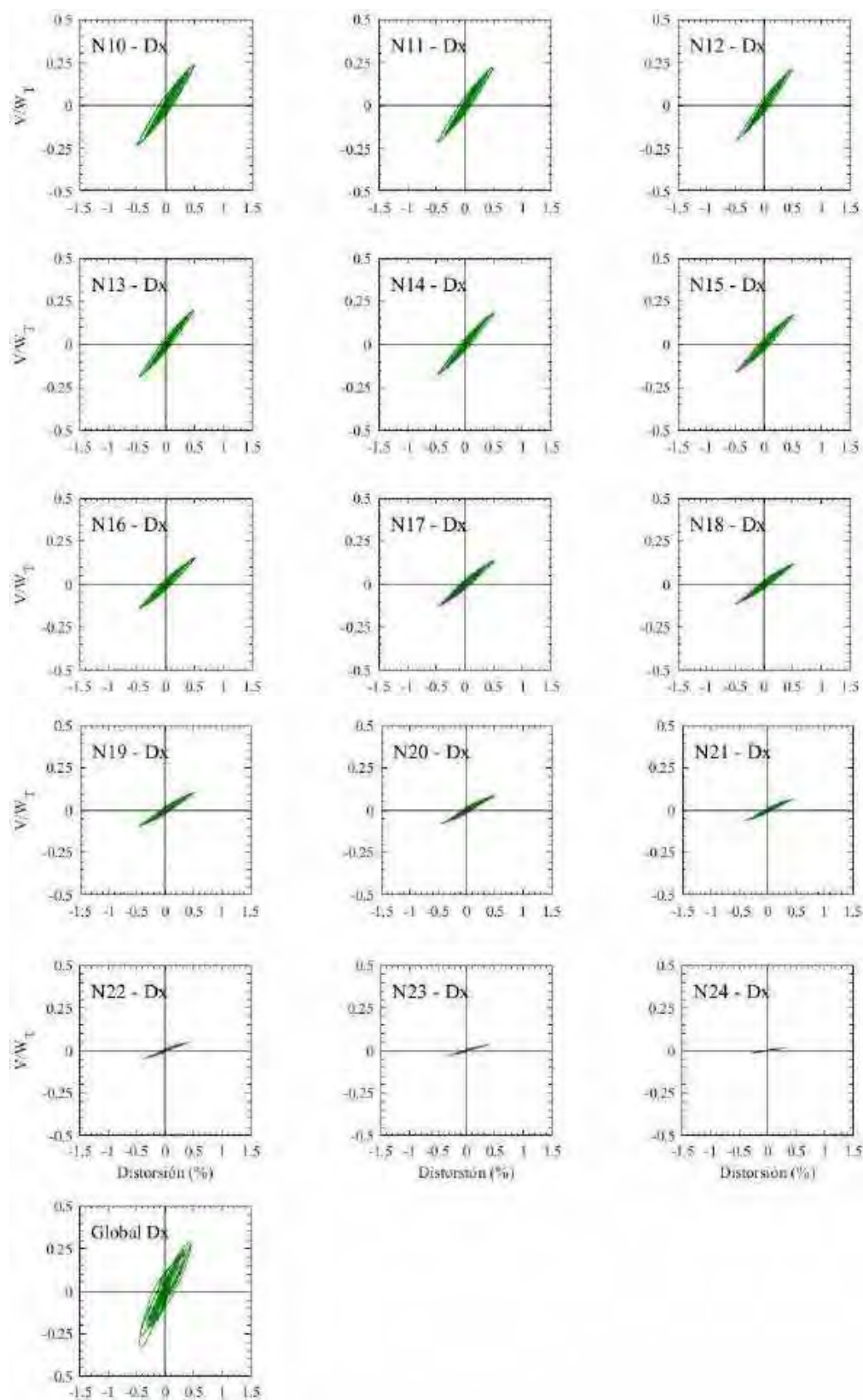
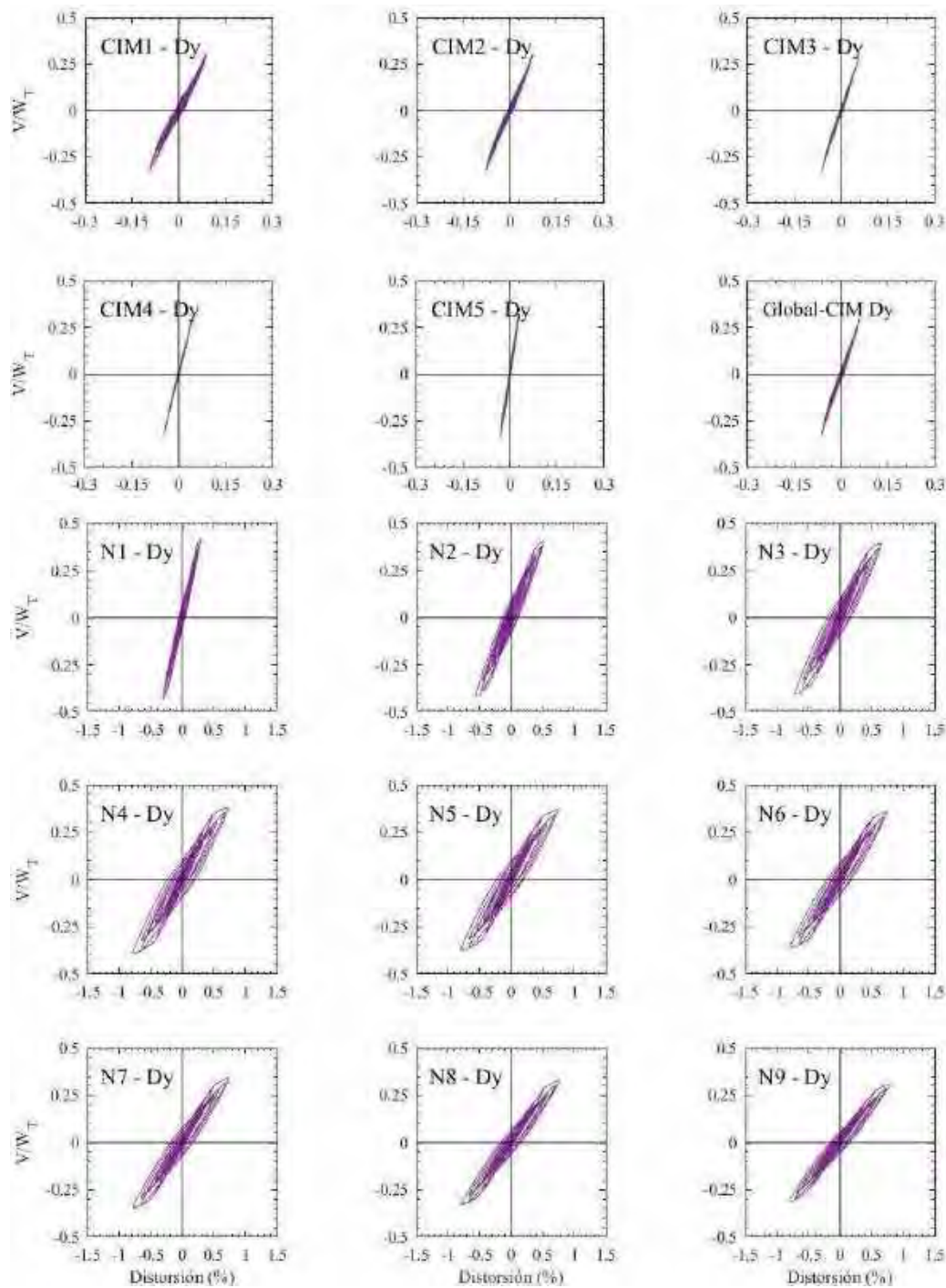


Figura H.176. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección x , registros de aceleración XO36-B (2017)

H.2.4 Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y



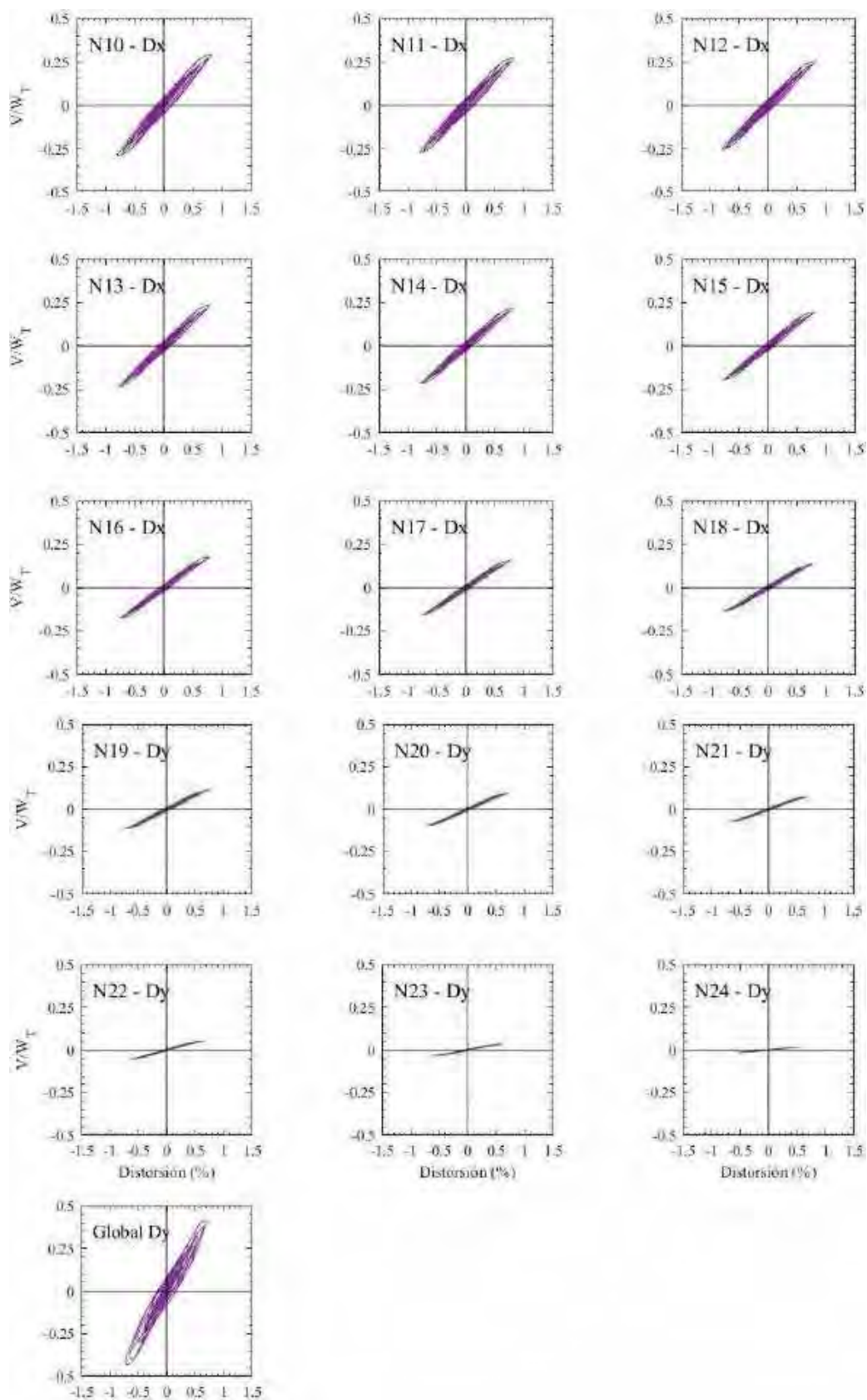
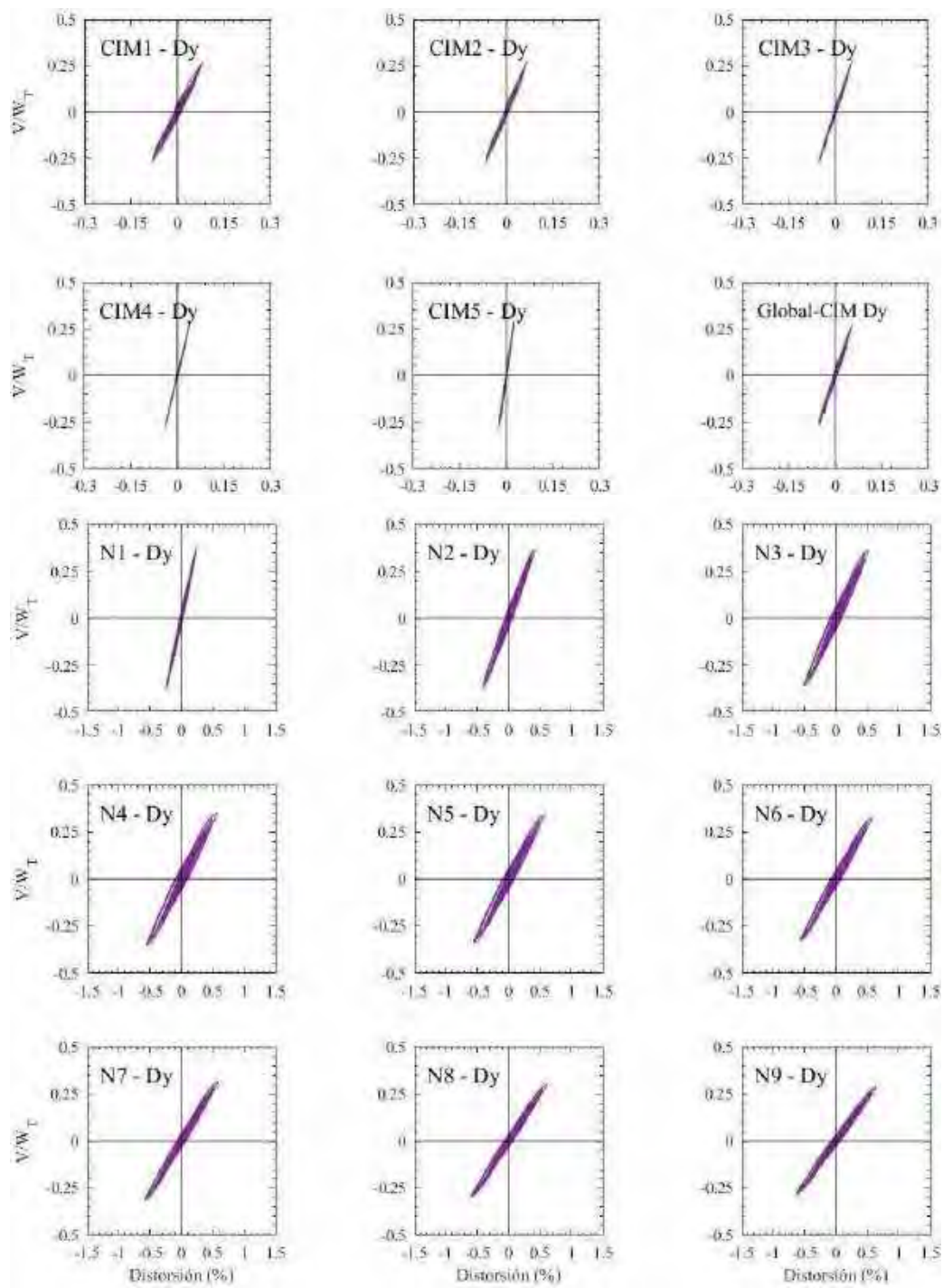


Figura H.177. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección y, registros de aceleración TL08-A



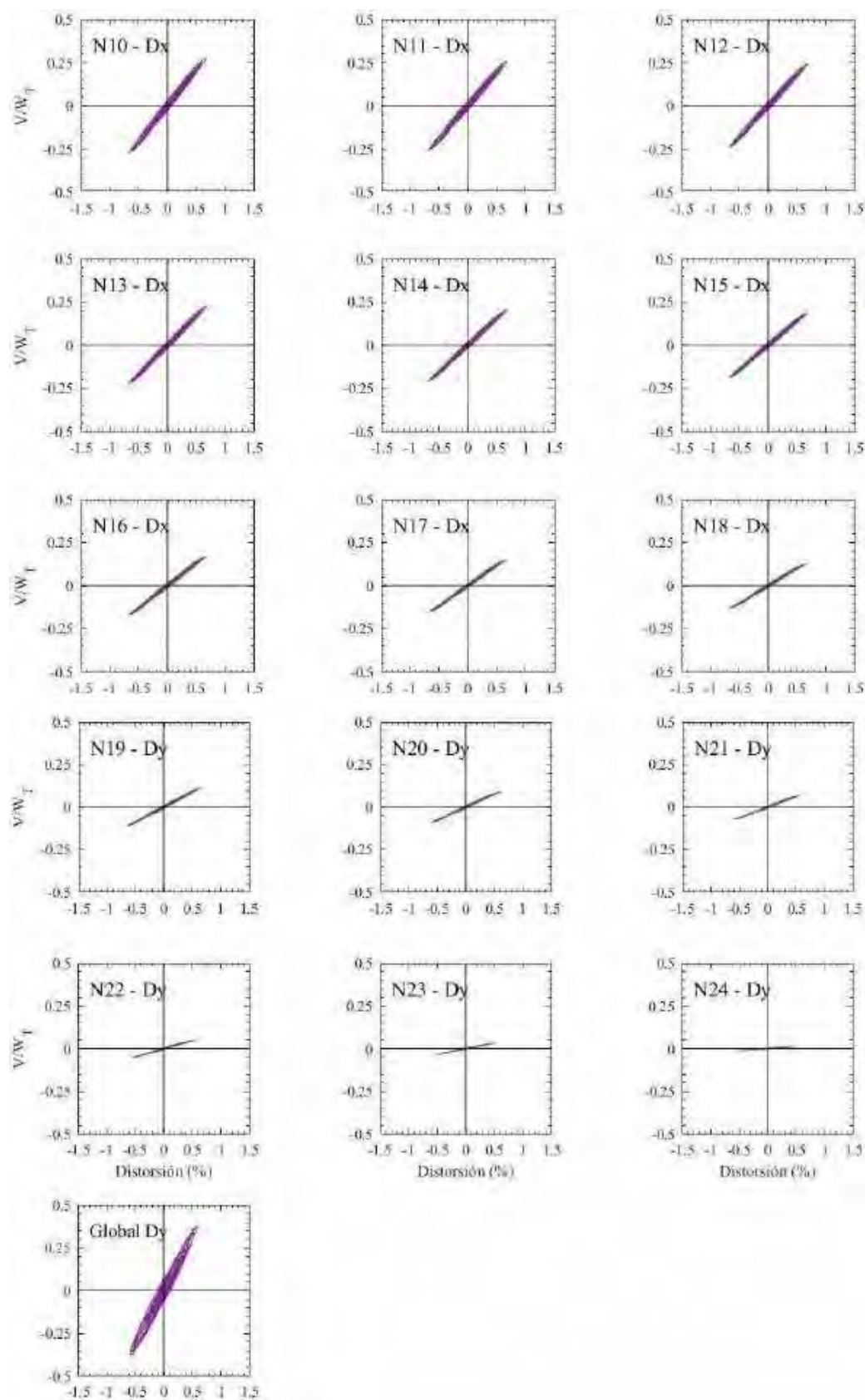
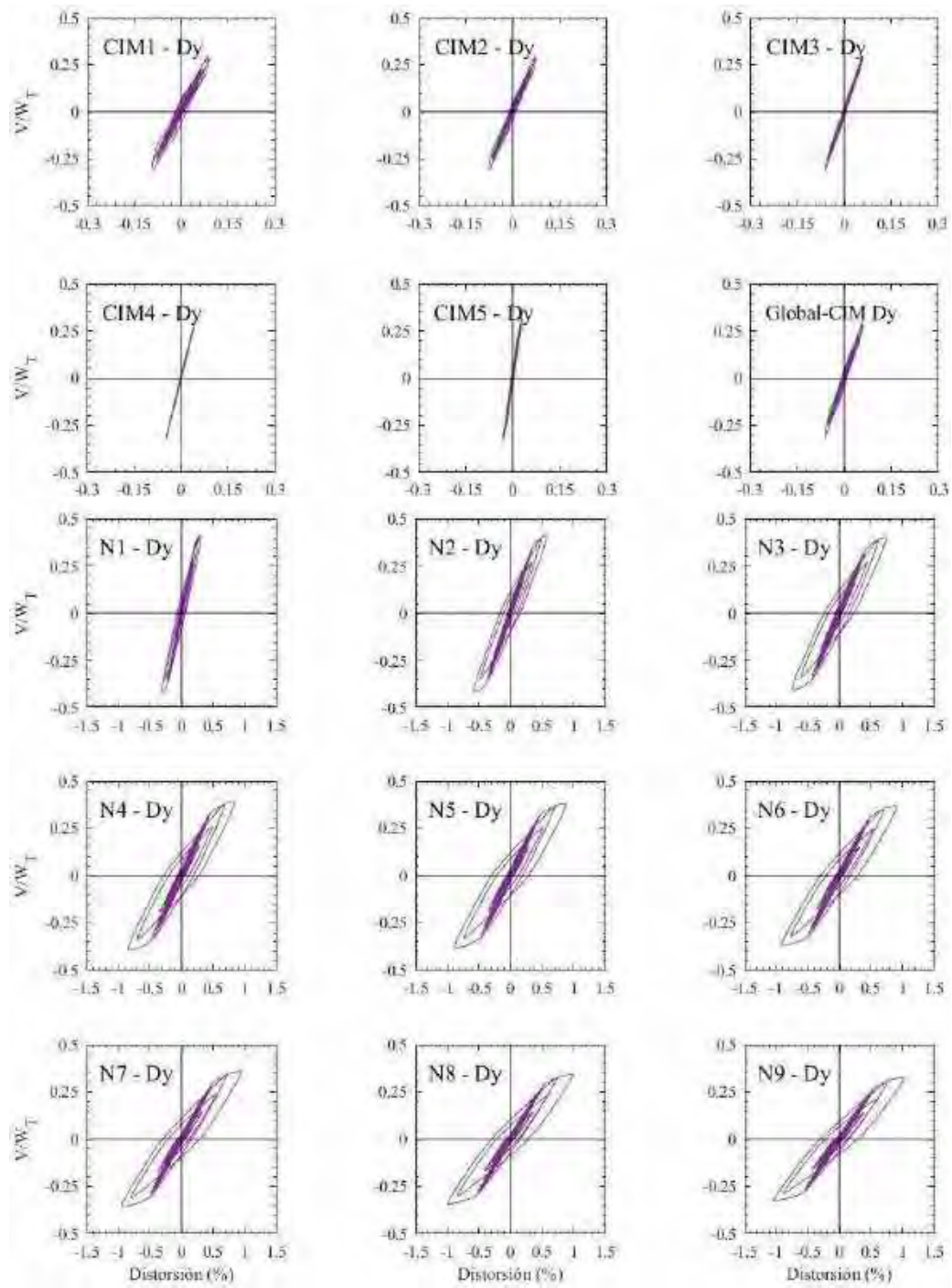


Figura H.178. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección y, registros de aceleración TL08-B



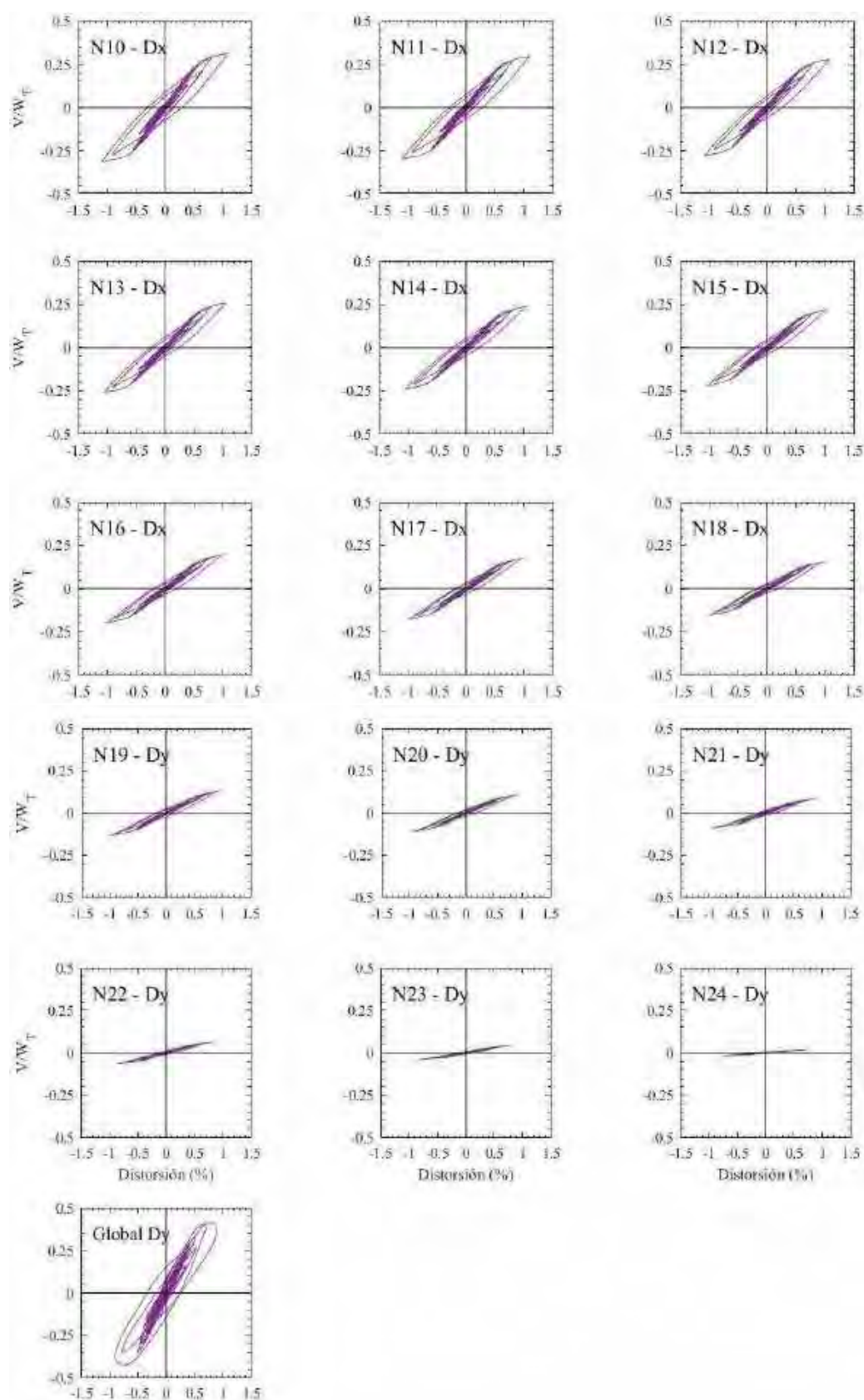
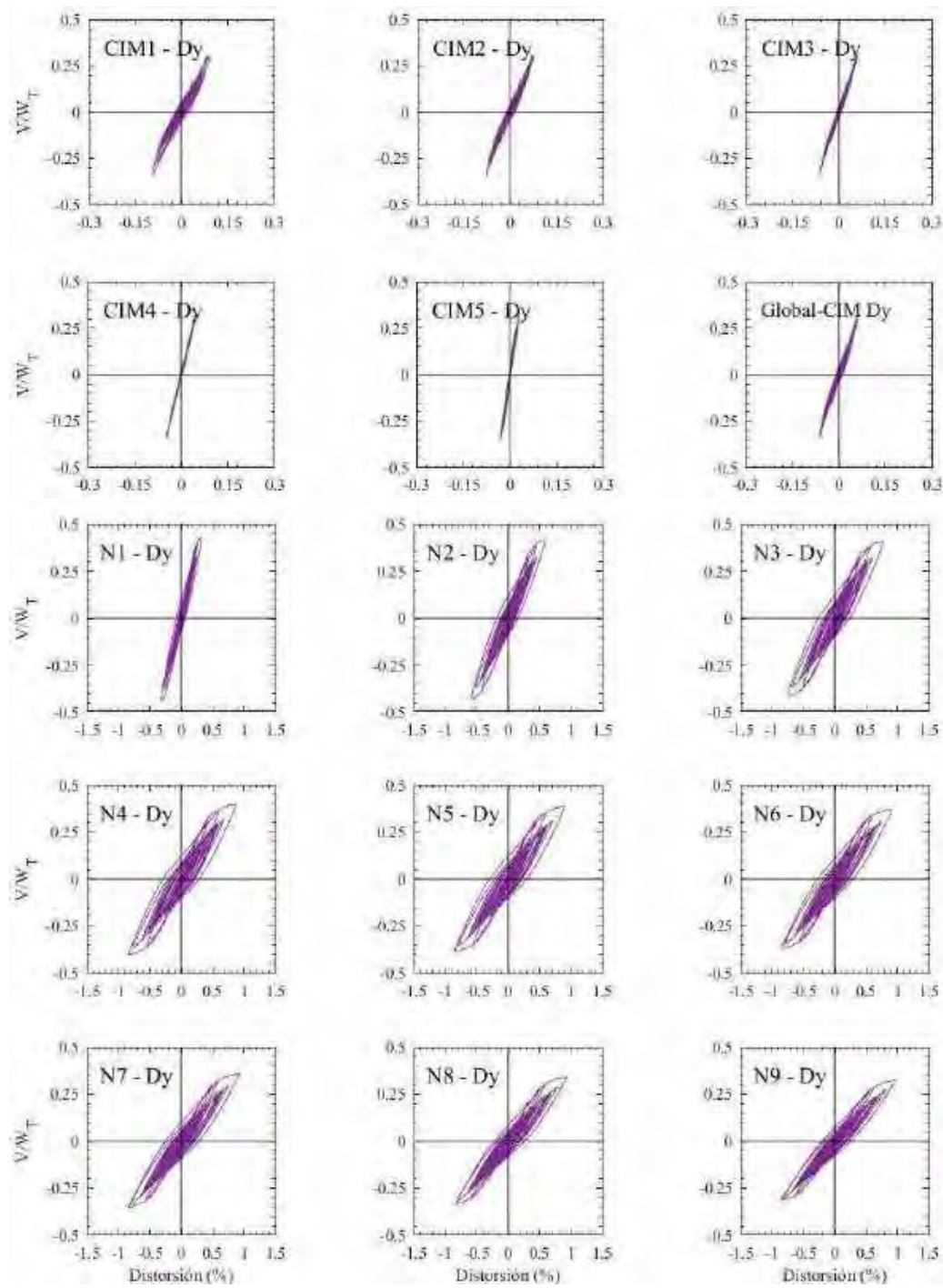


Figura H.179. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CJ03-A



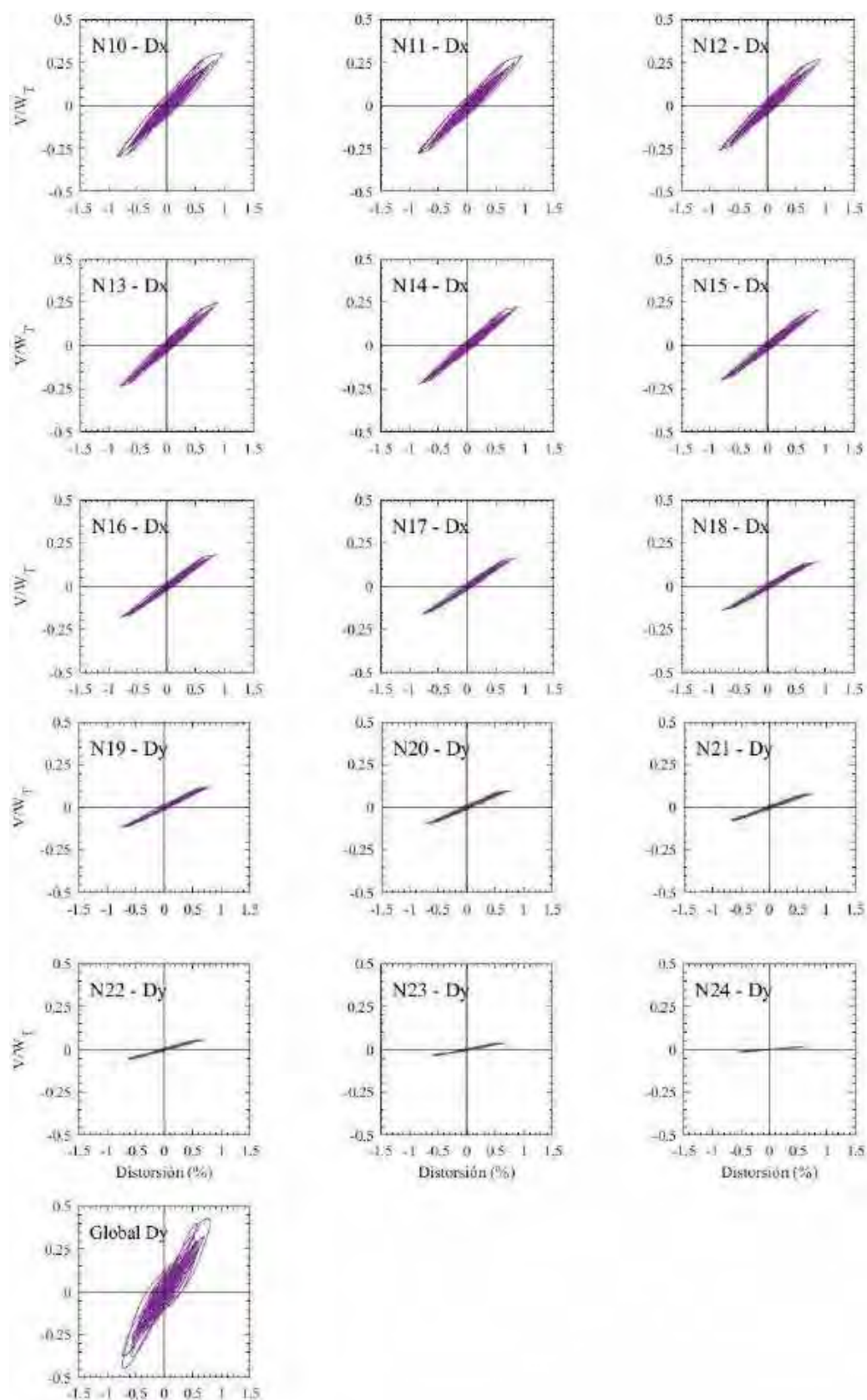
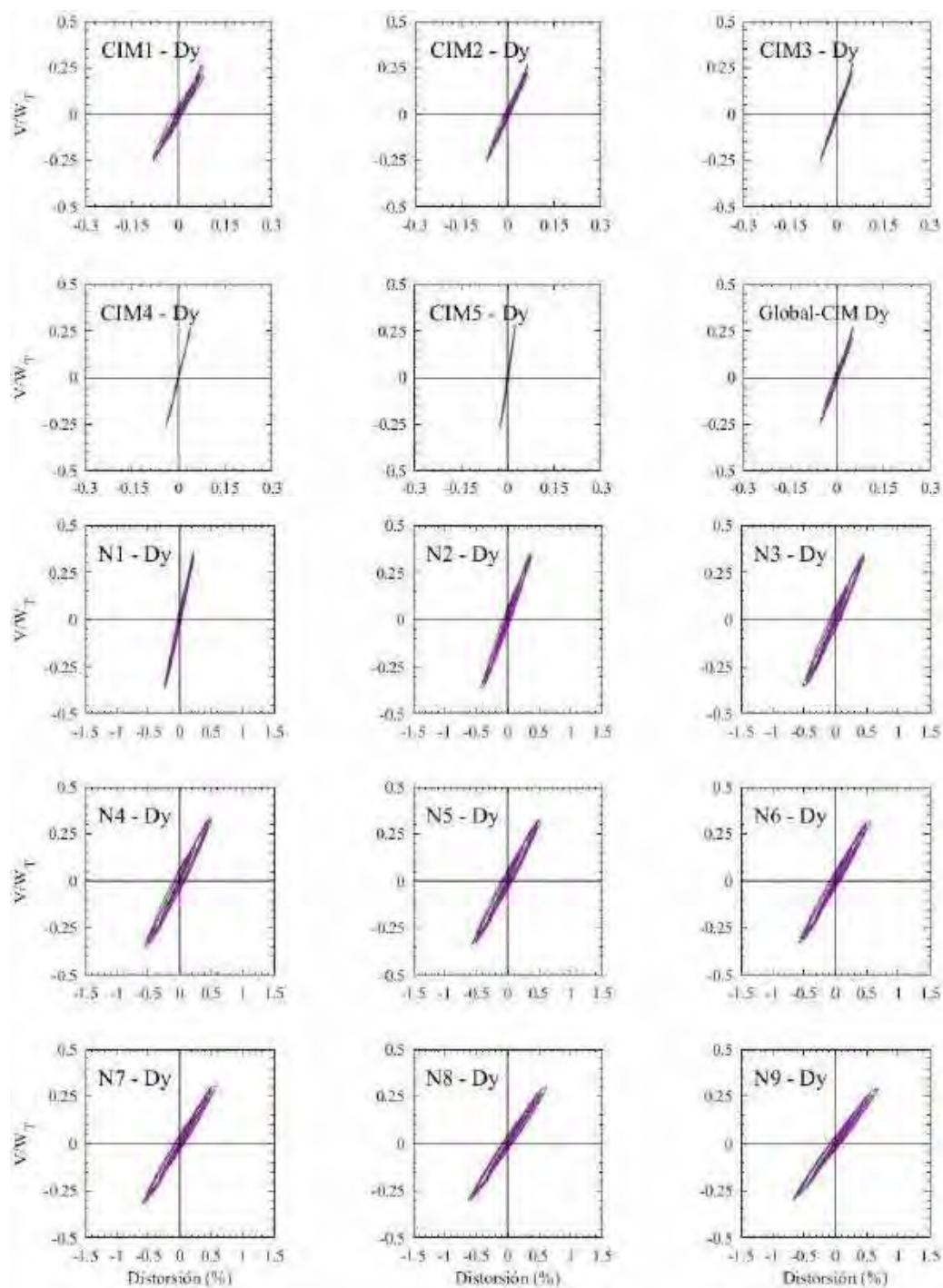


Figura H.180. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección y, registros de aceleración CJ03-B



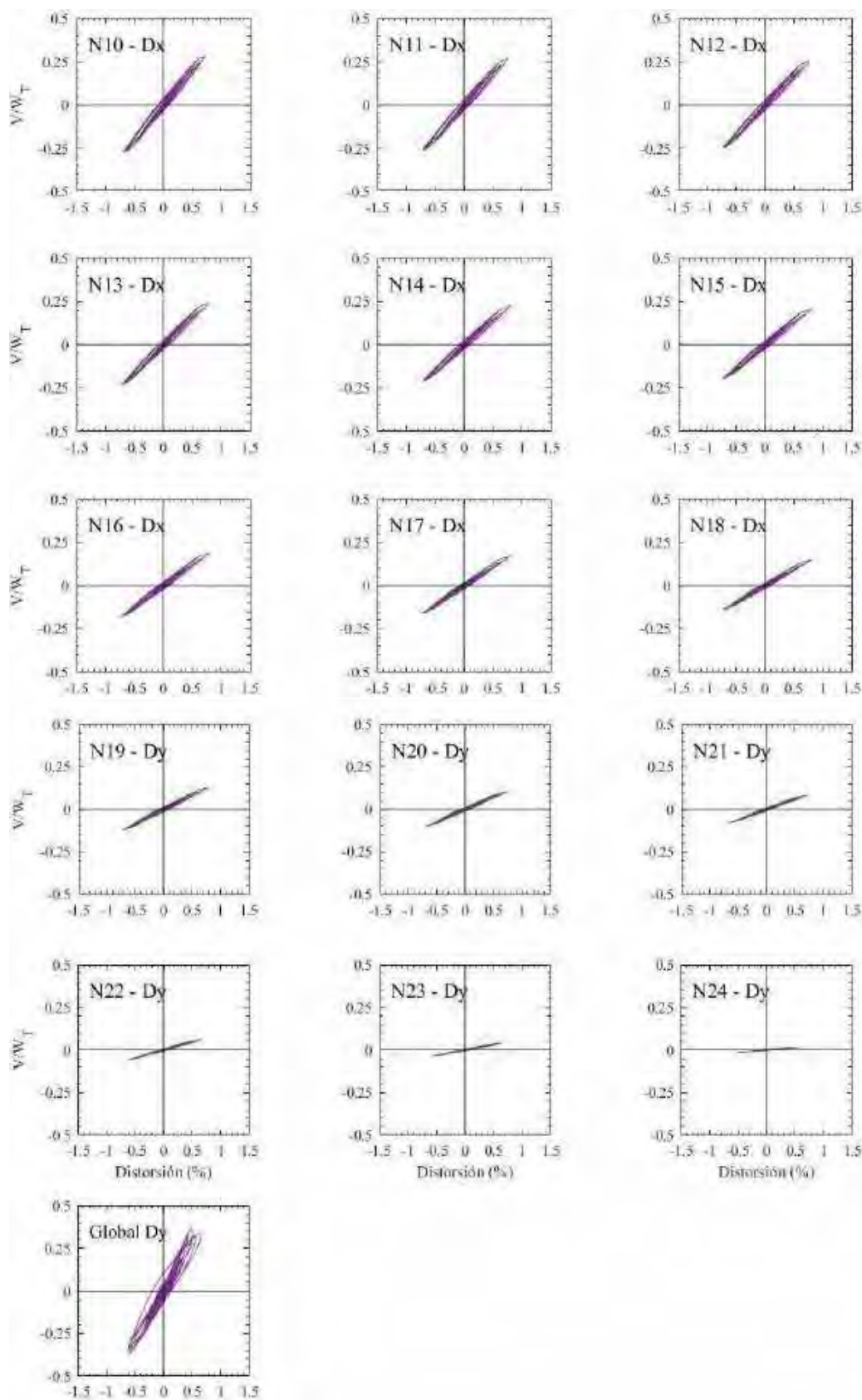
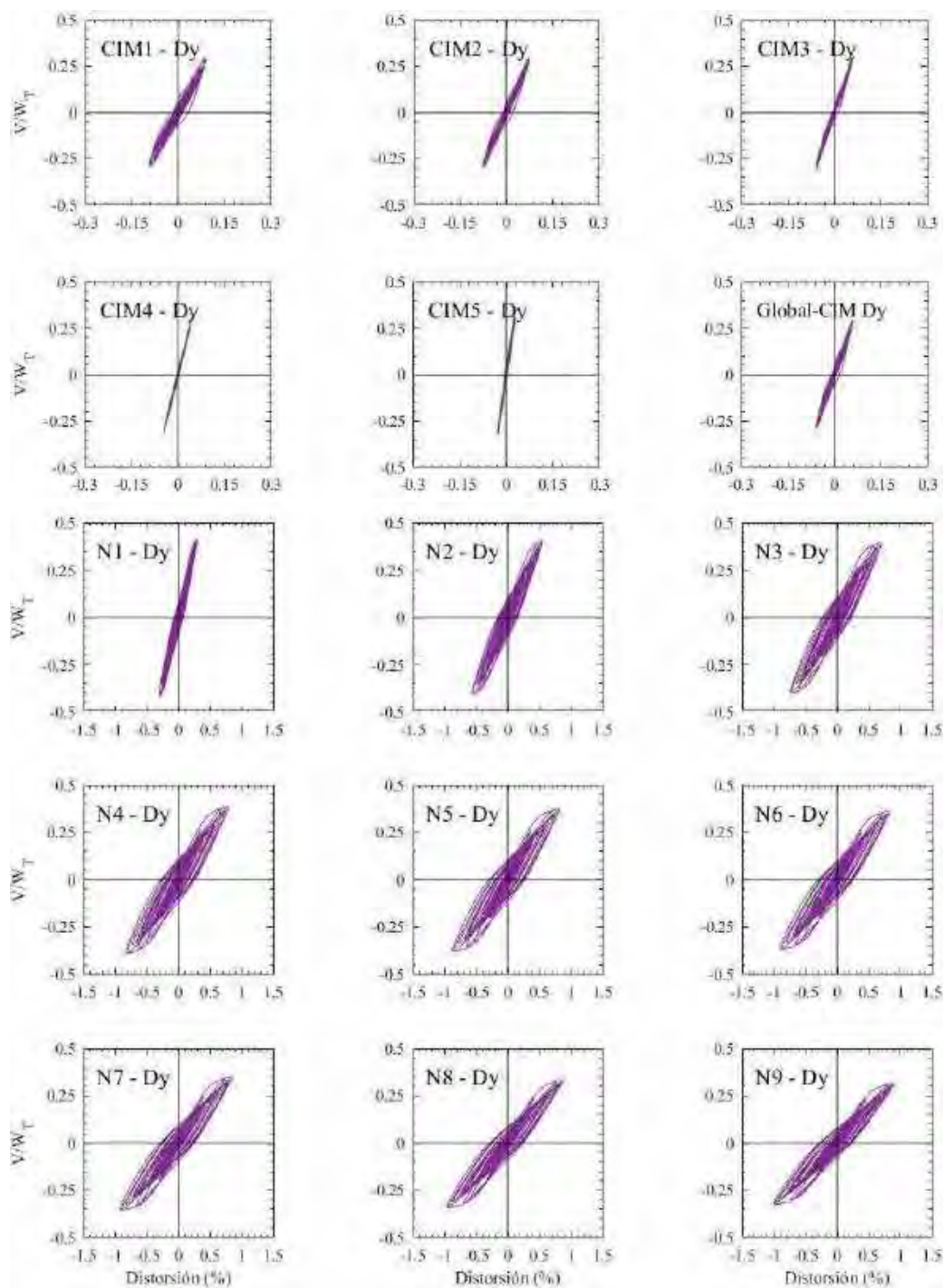


Figura H.181. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración ALAM85-A



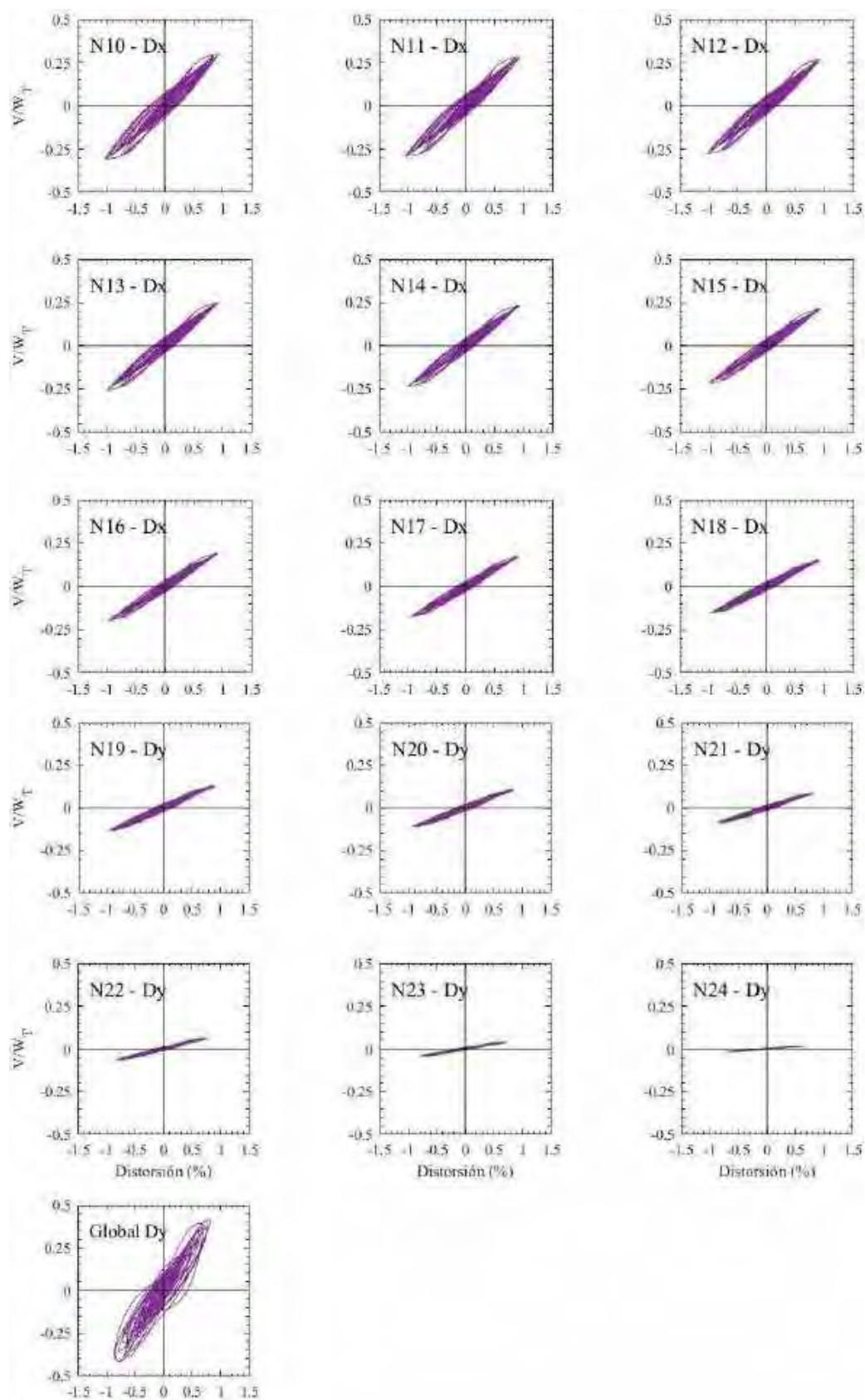
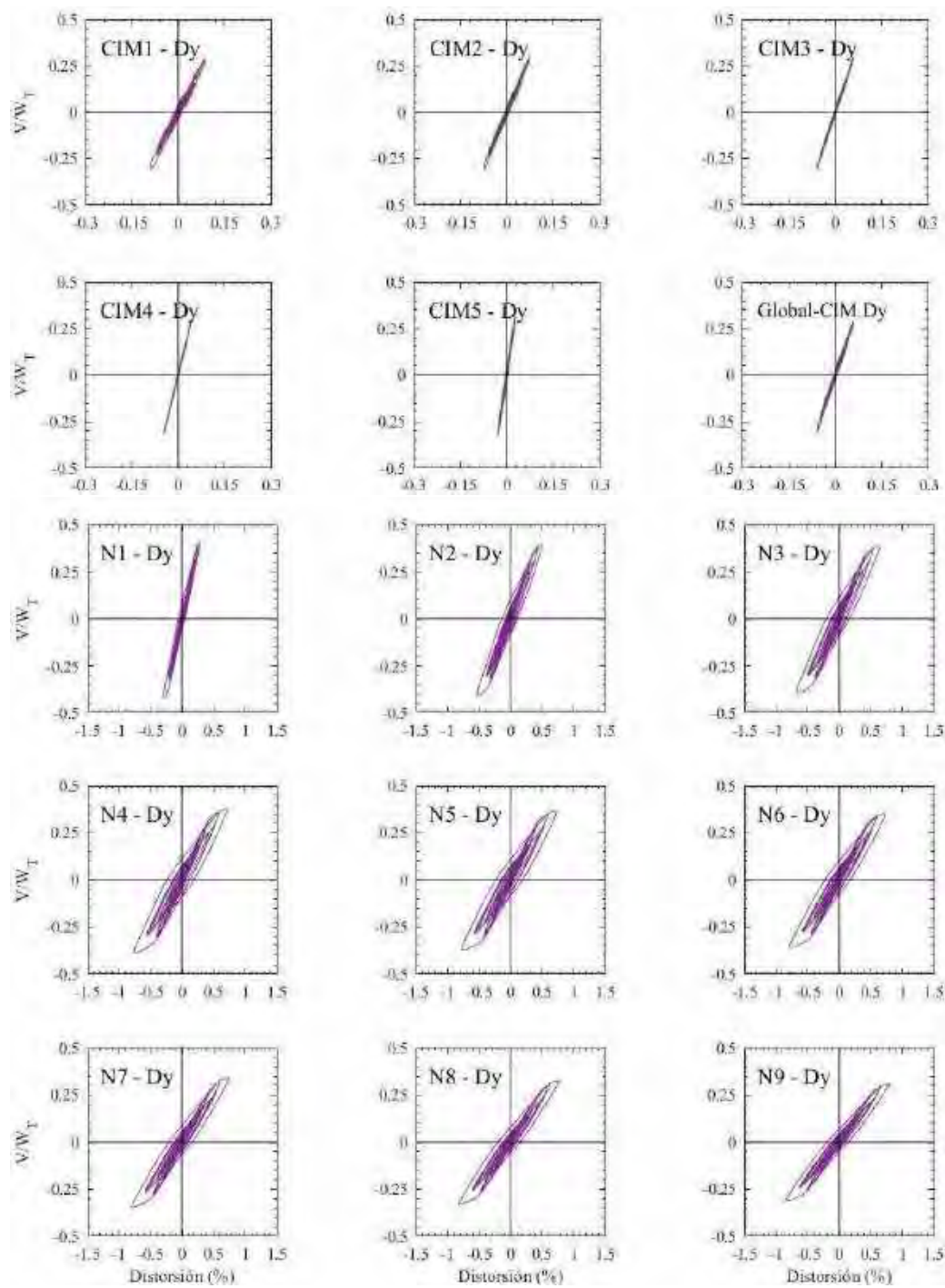


Figura H.182. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración ALAM85-B



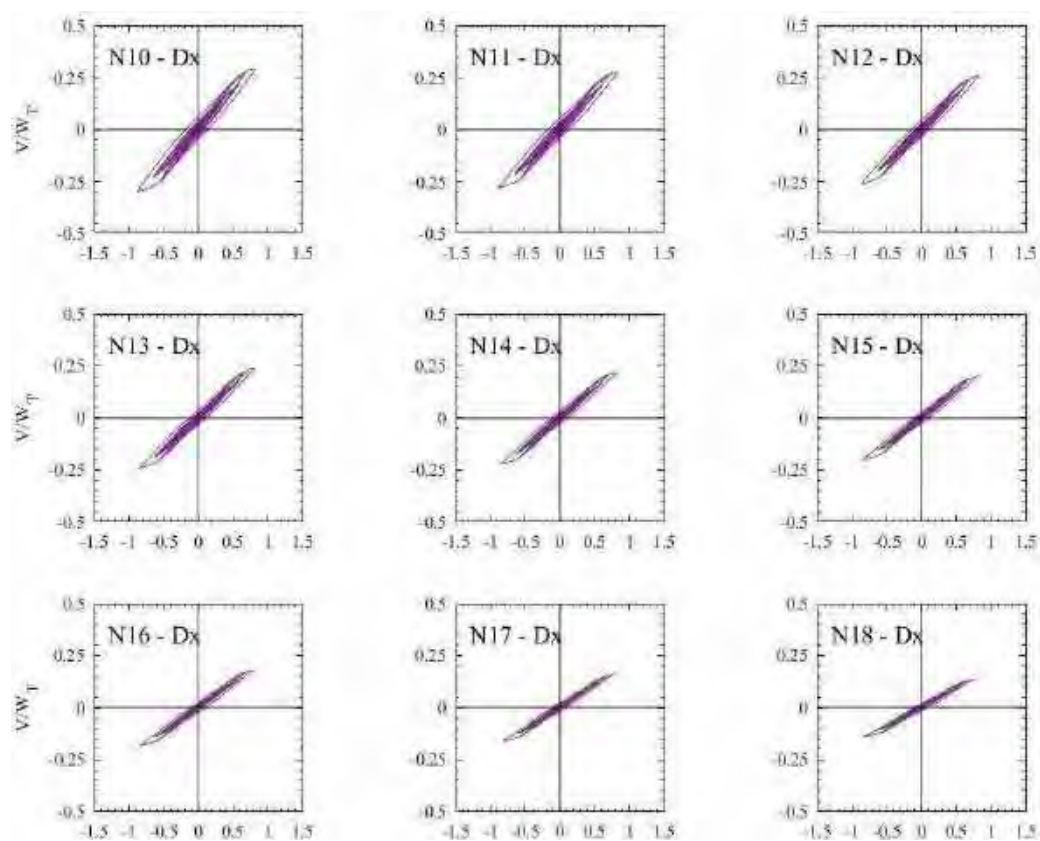
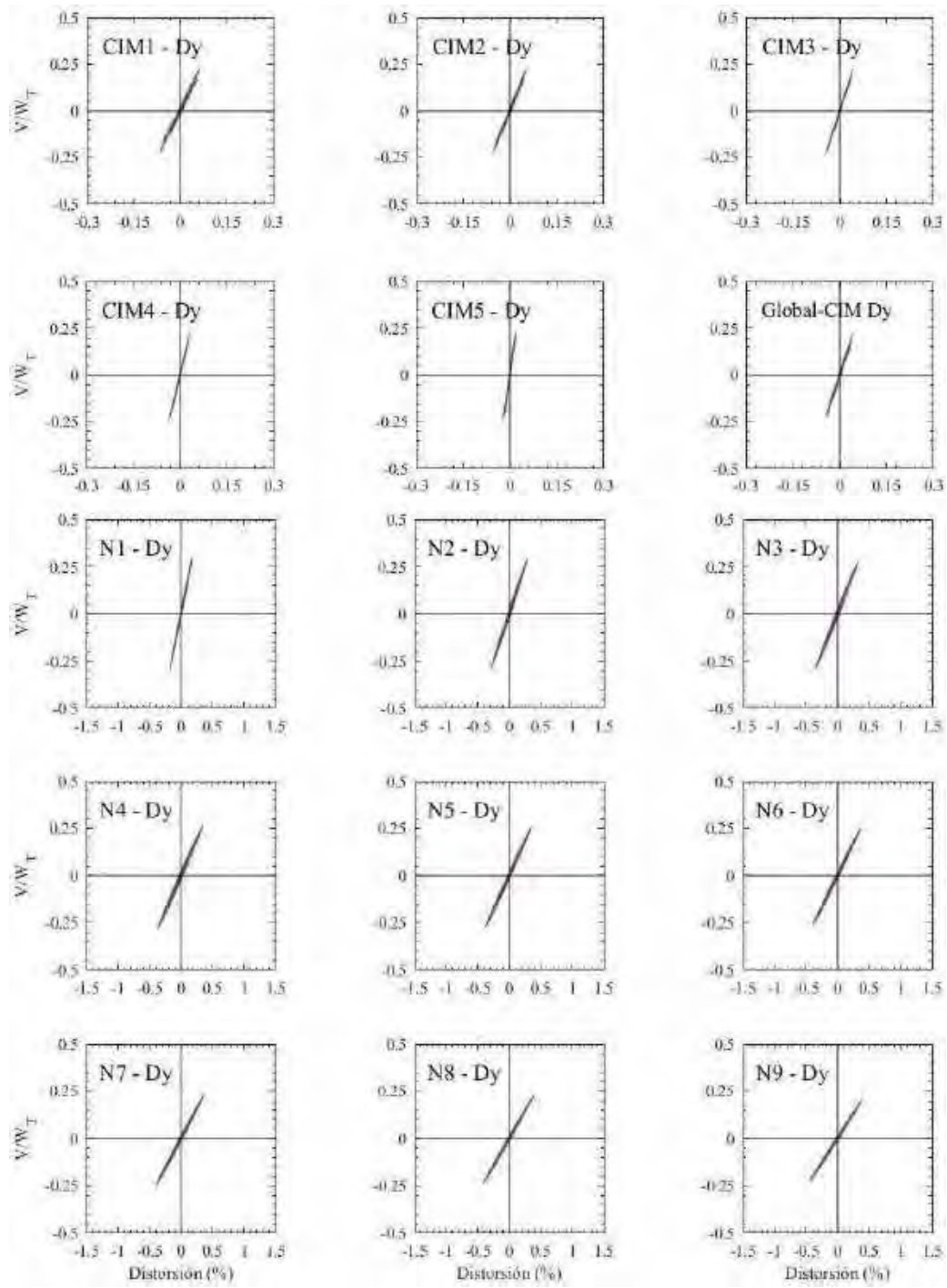


Figura H.183. Ciclos de histéresis de los entresijos en dirección y, registros de aceleración TBOM-A (1985)



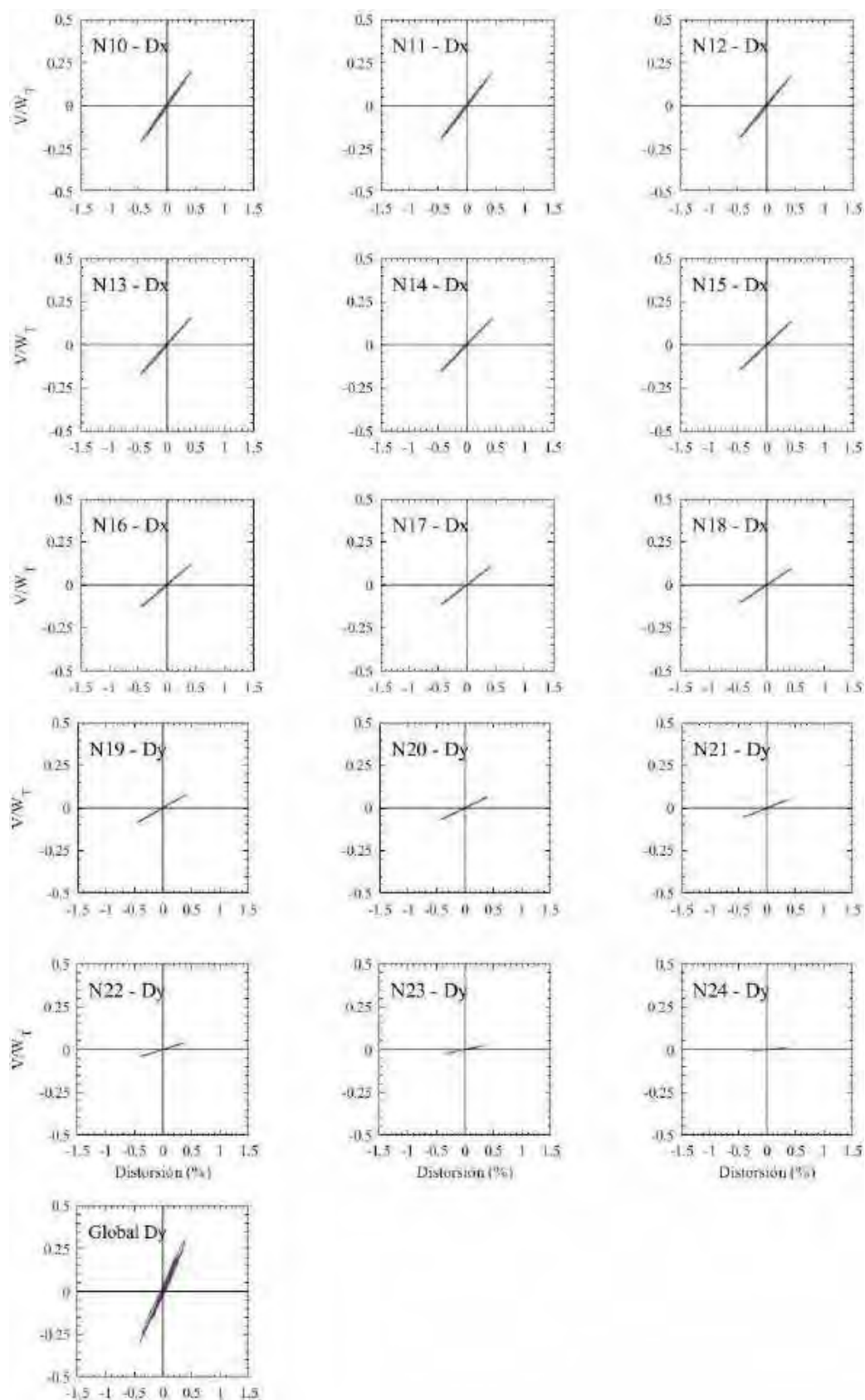
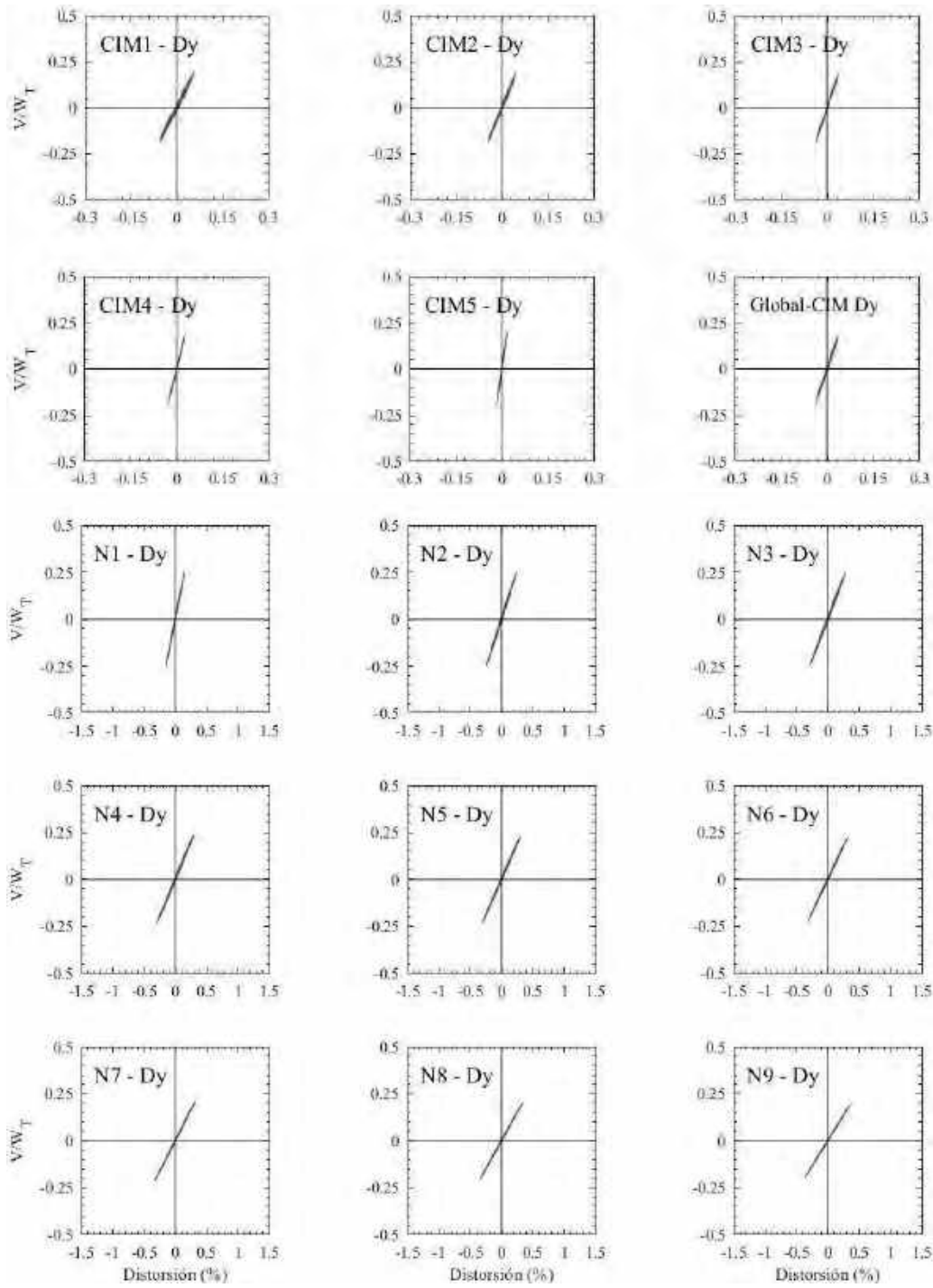


Figura H.184. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración TBOM –B (1985)



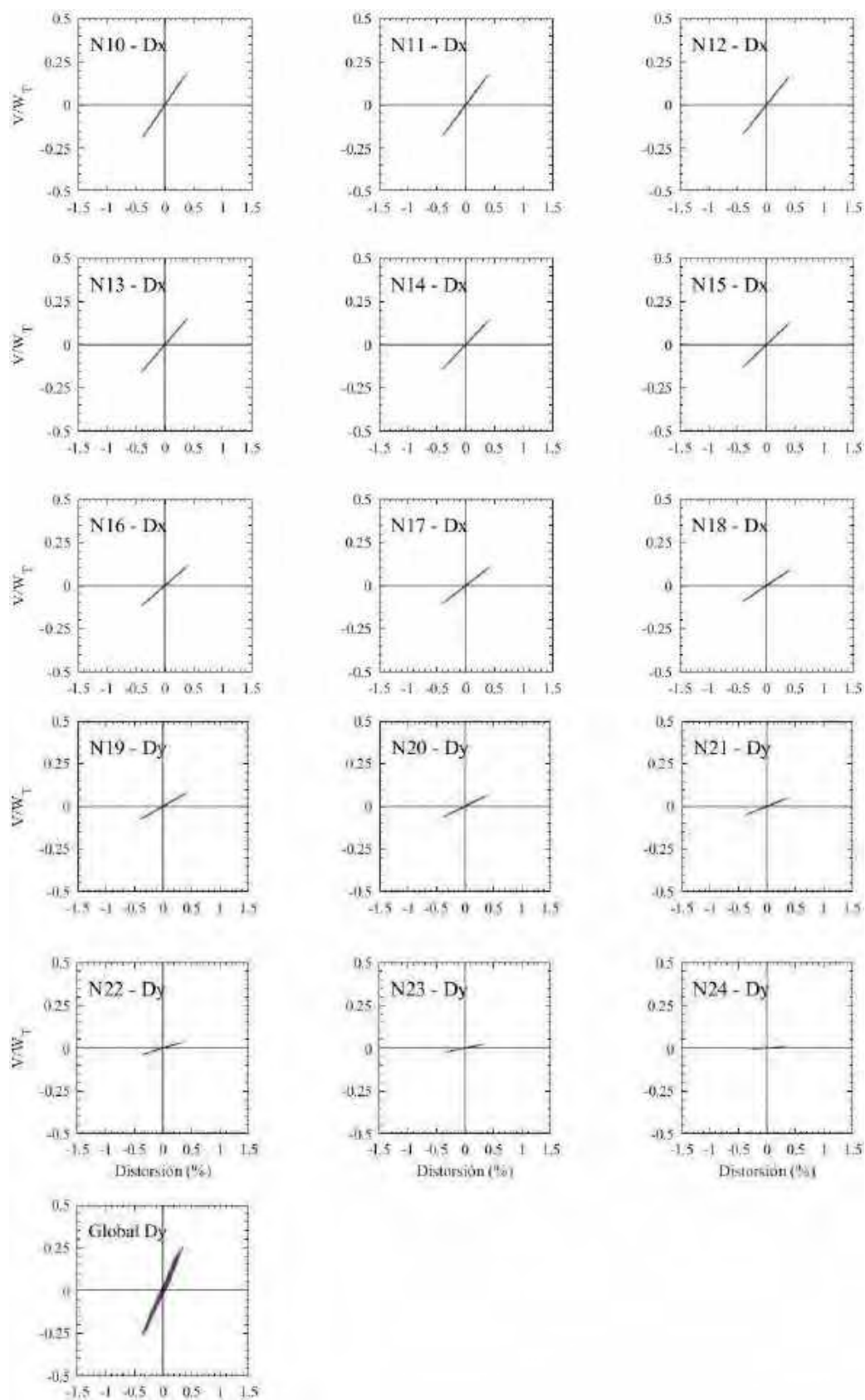
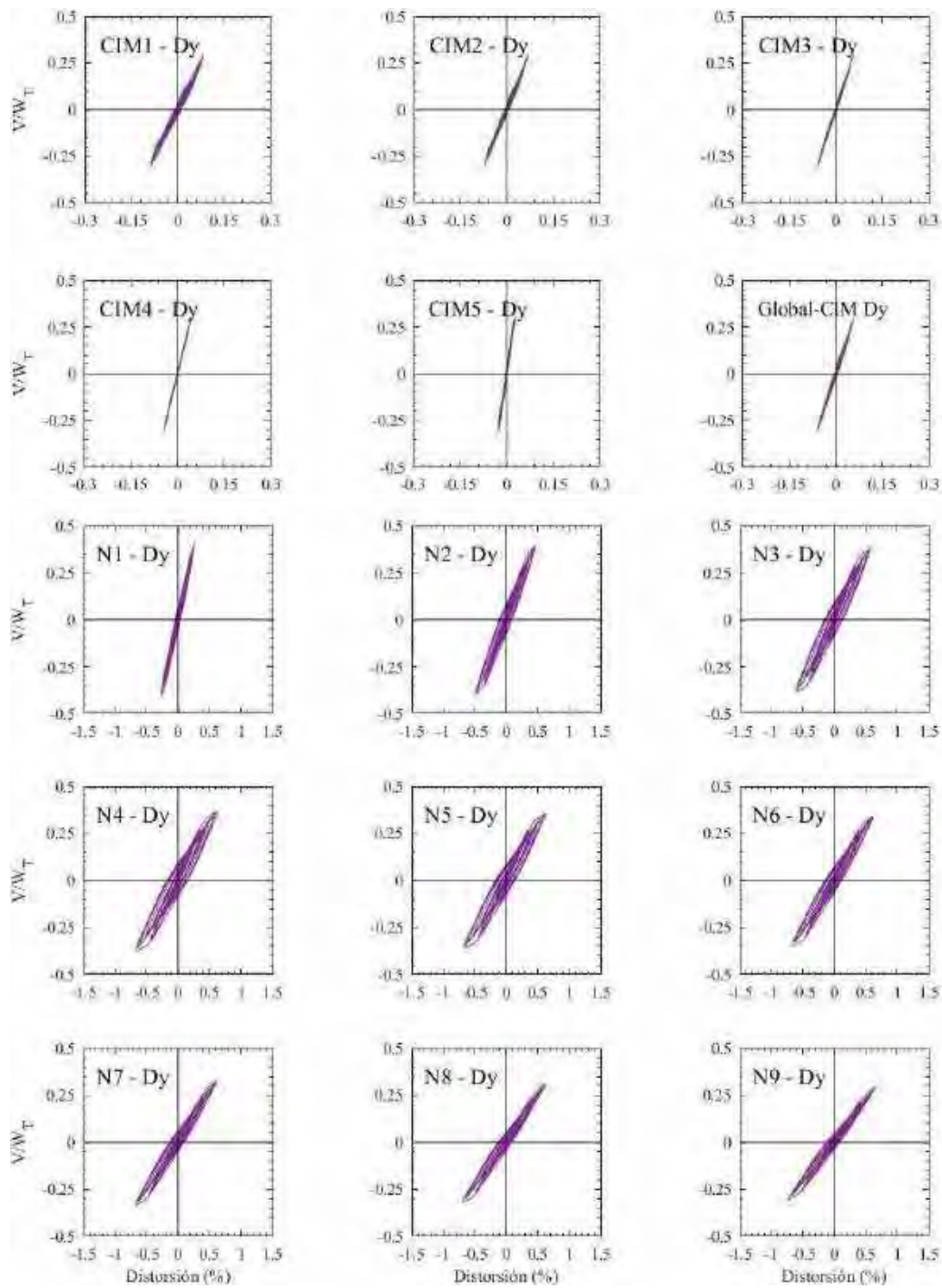


Figura H.185. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración SCT185-A (1985)



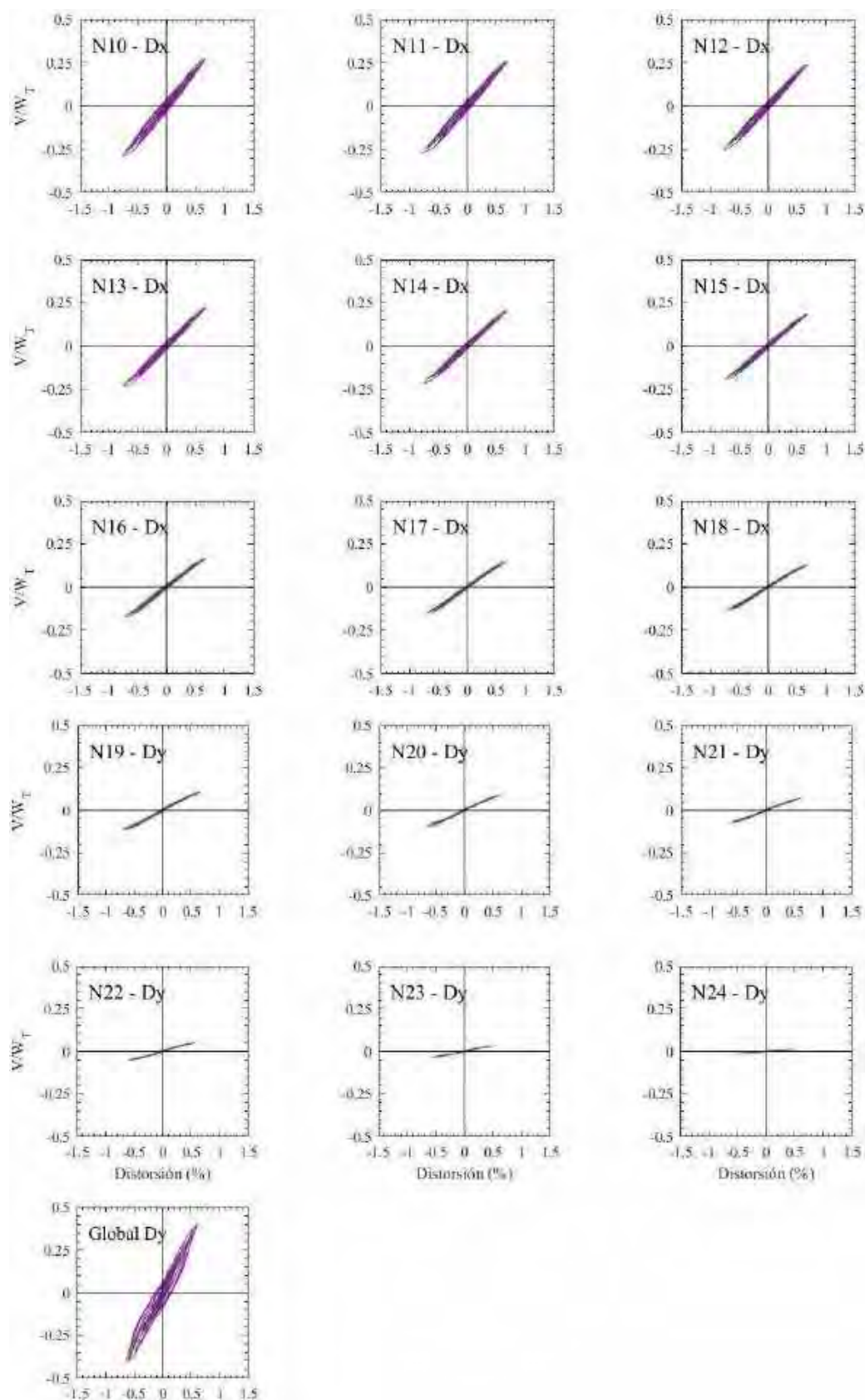
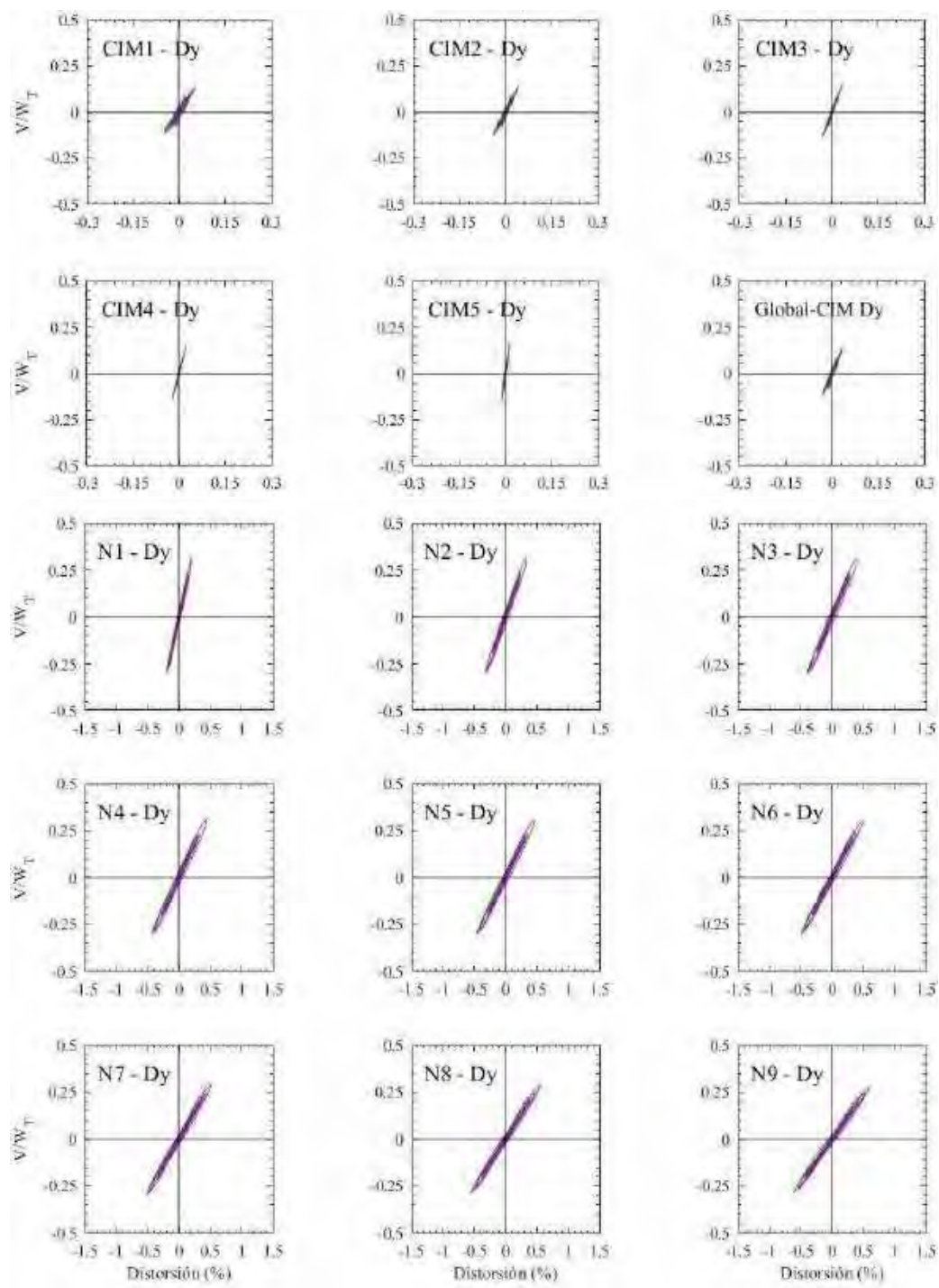


Figura H.186. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración SCT185-B (1985)



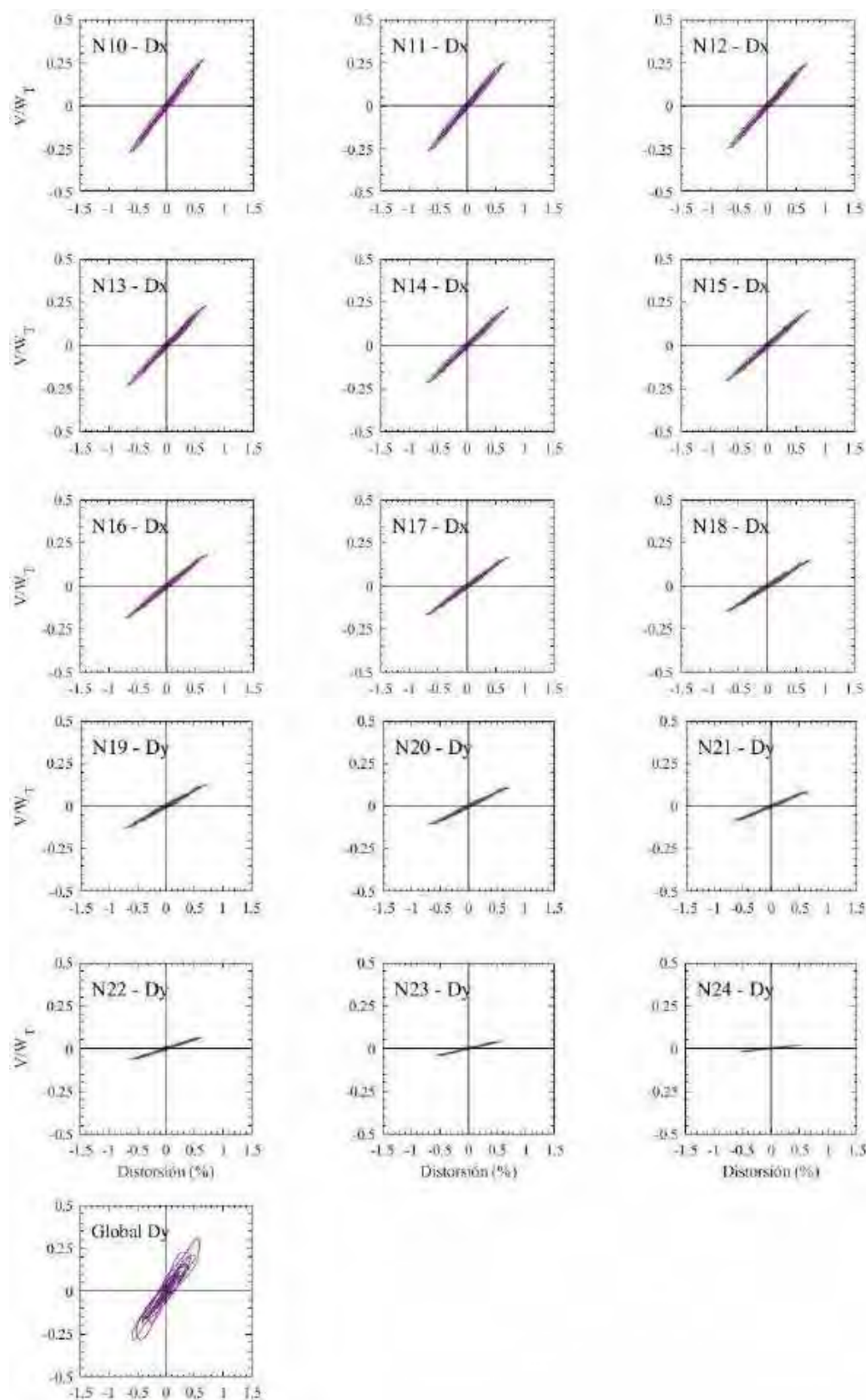
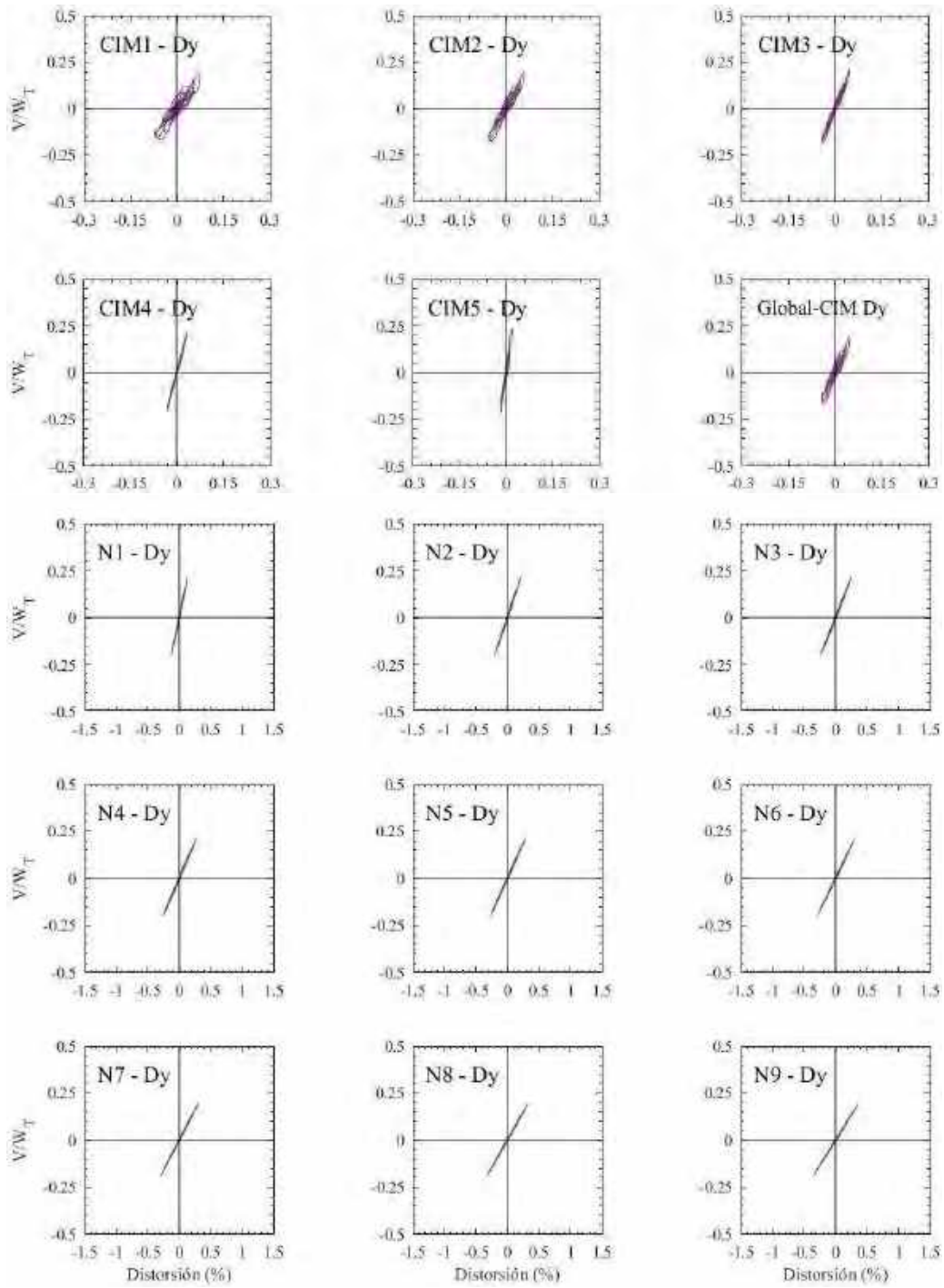


Figura H.187. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CH84-A (2017)



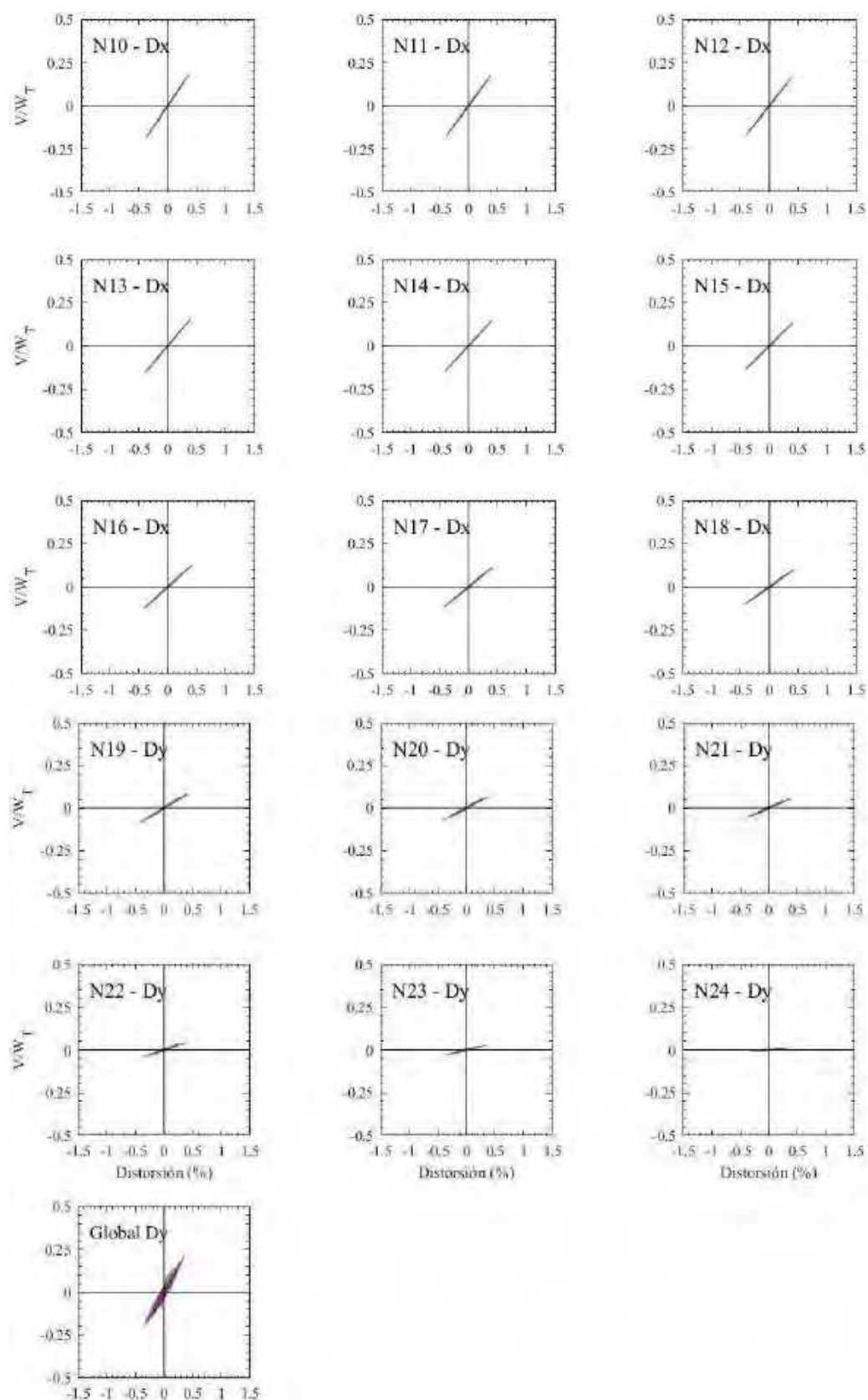
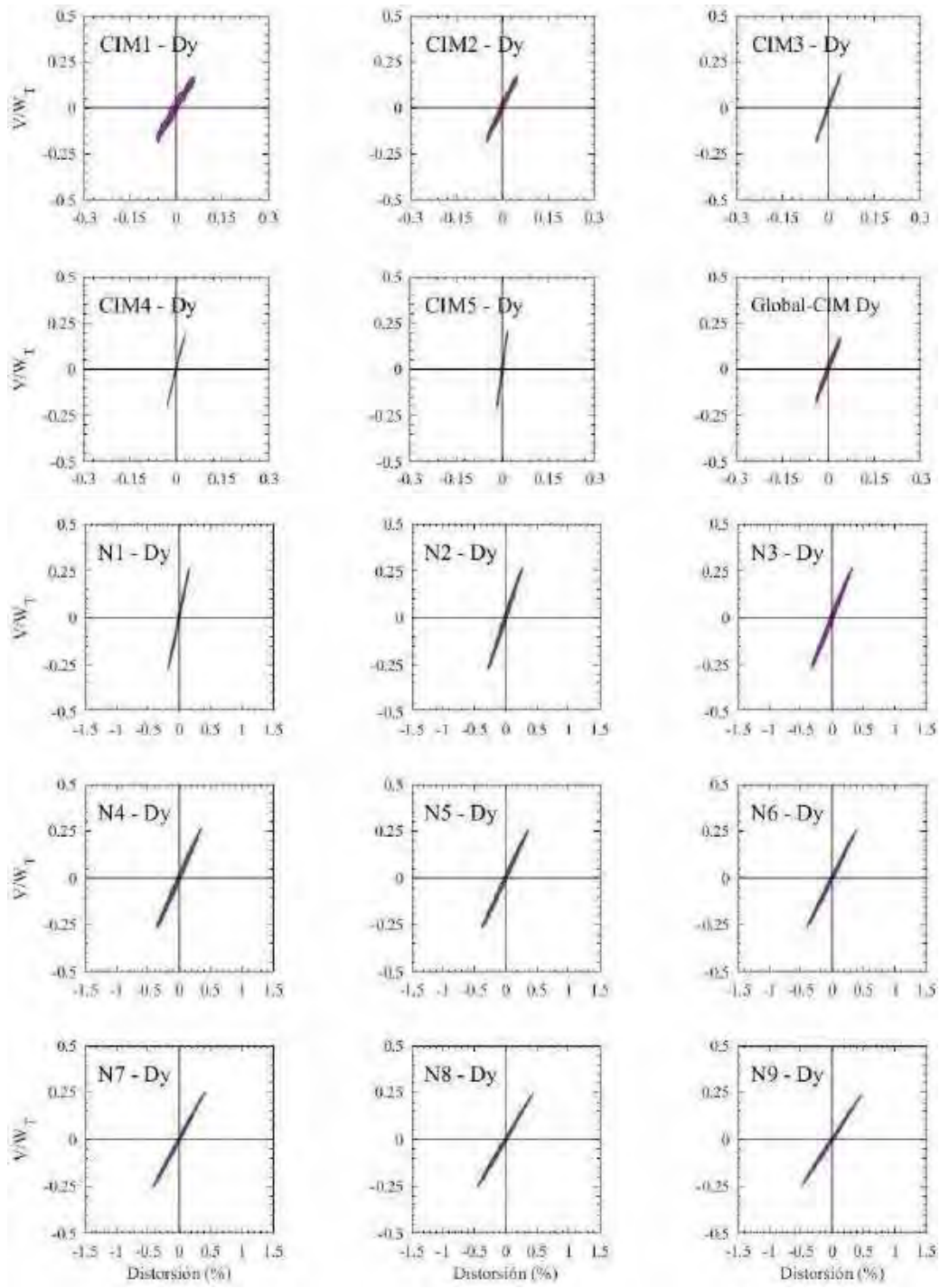


Figura H.188. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración CH84-B (2017)



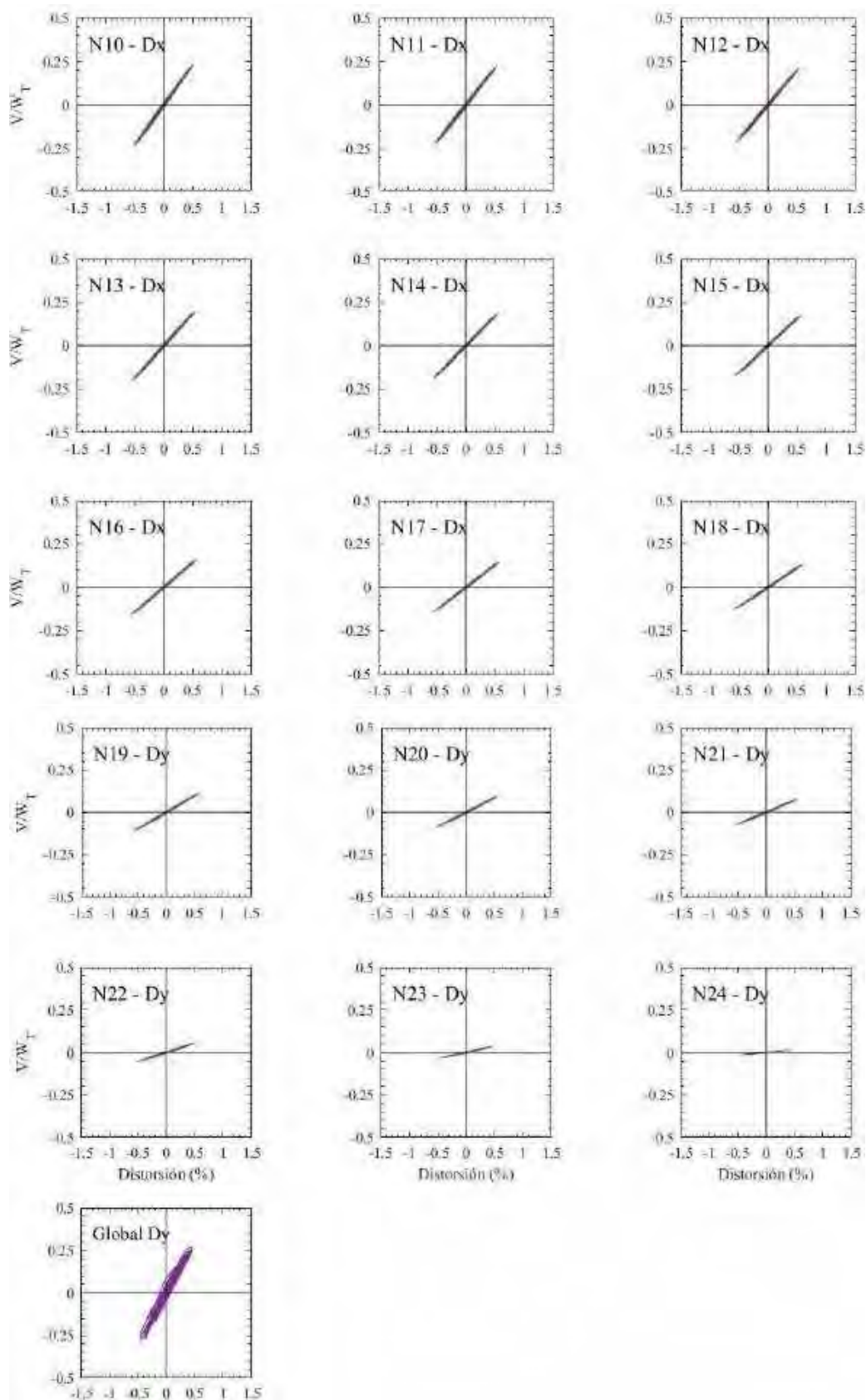
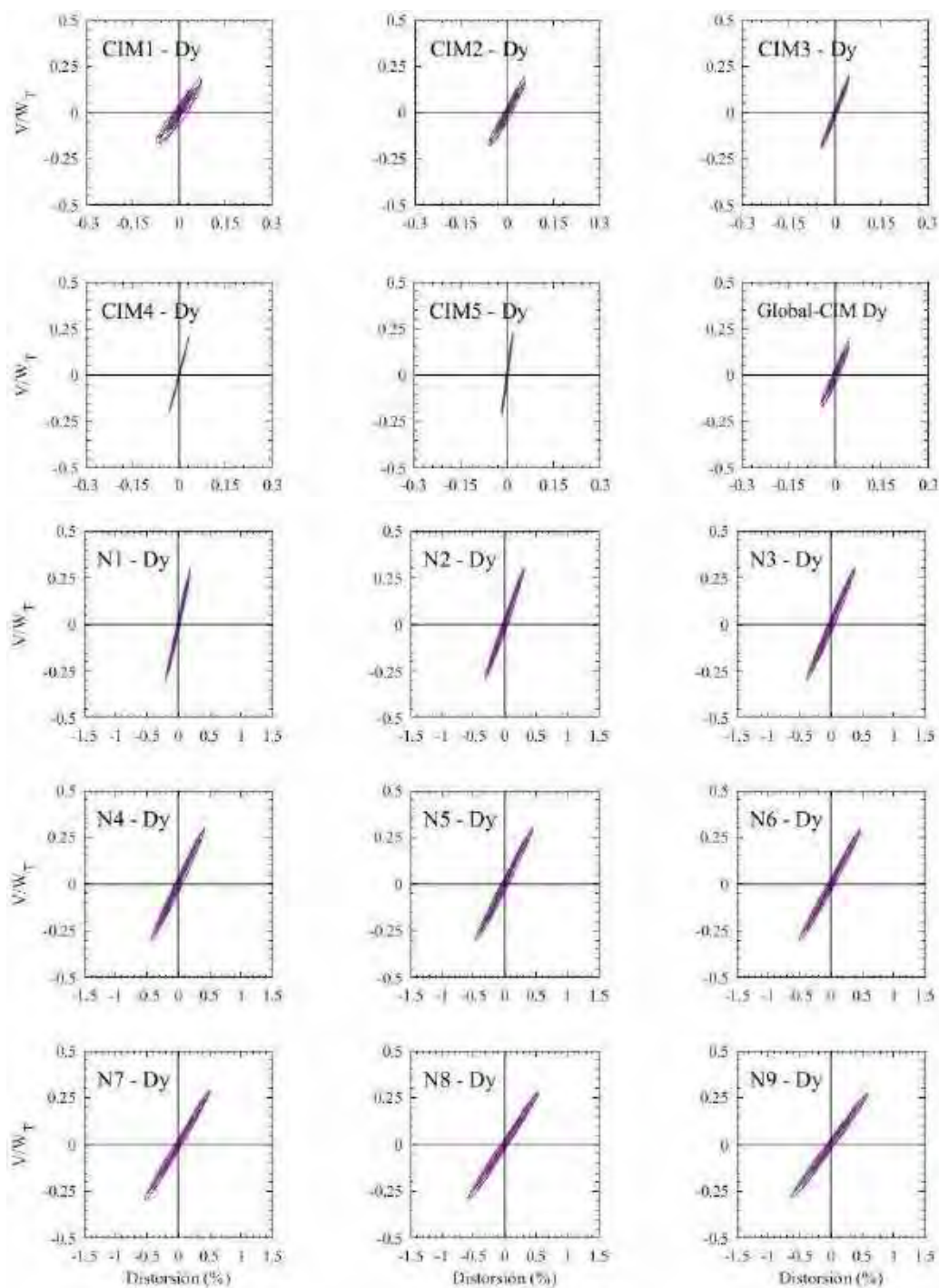


Figura H.189. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración MI15-A (2017)



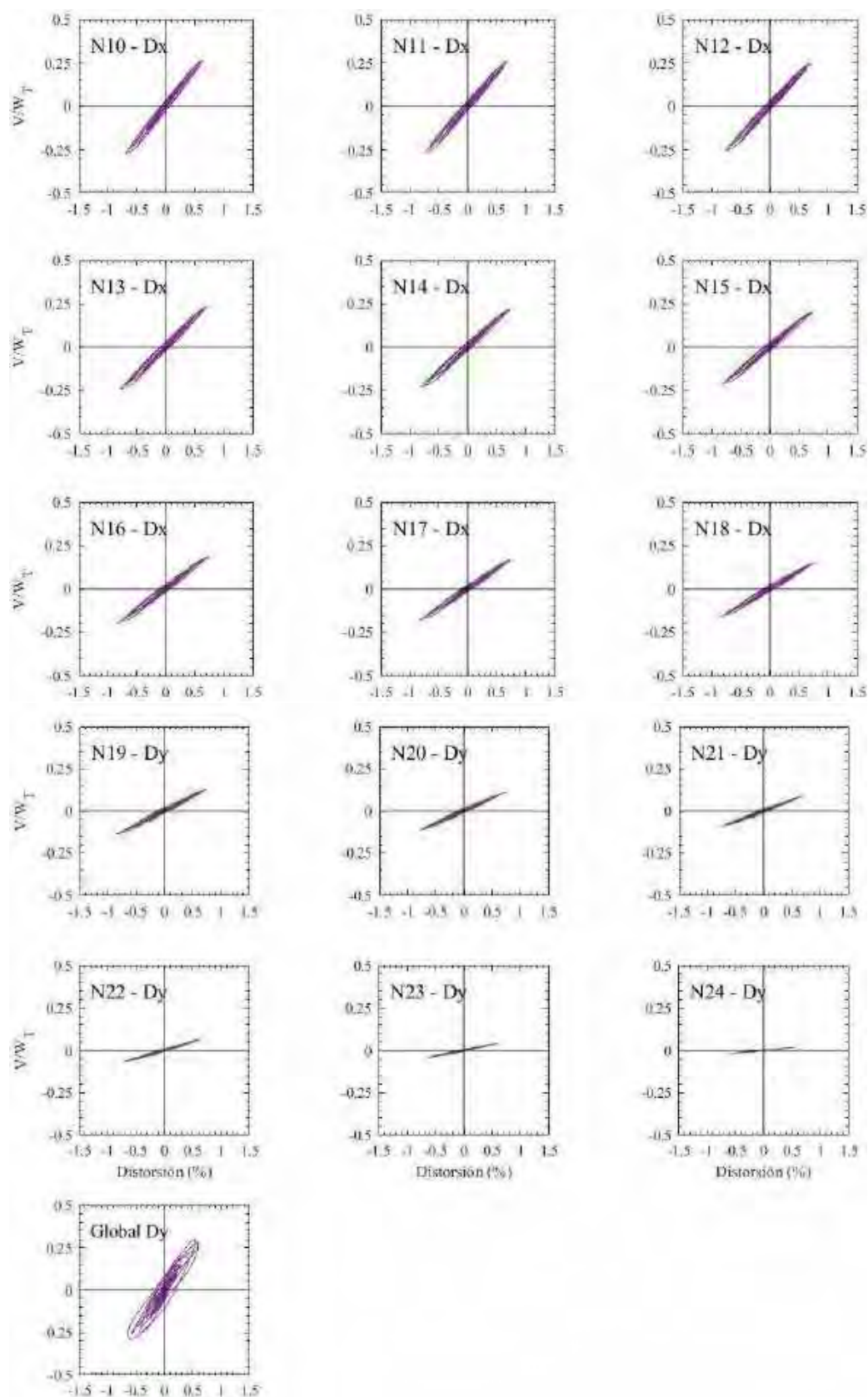
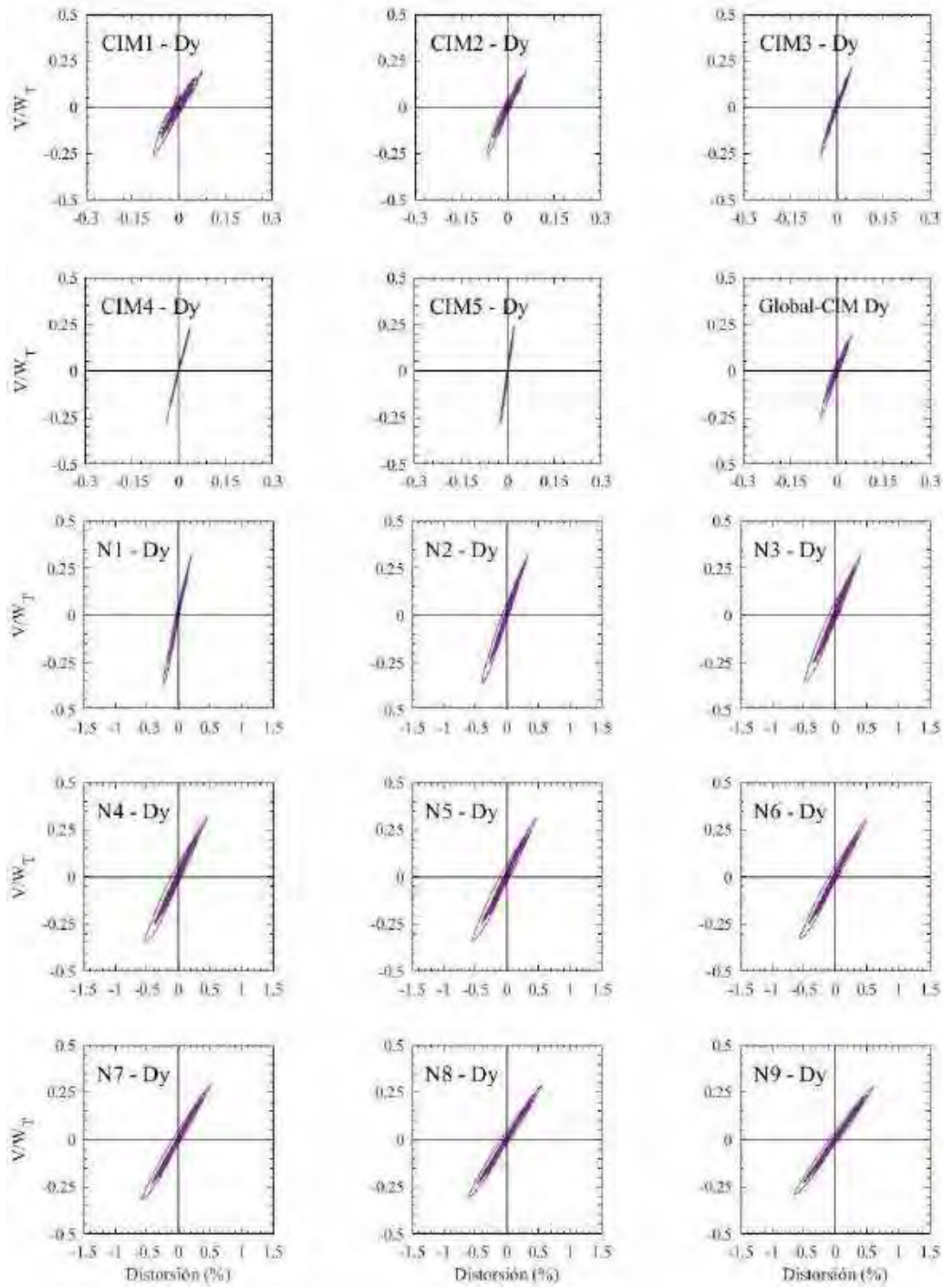


Figura H.190. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración MI15-B (2017)



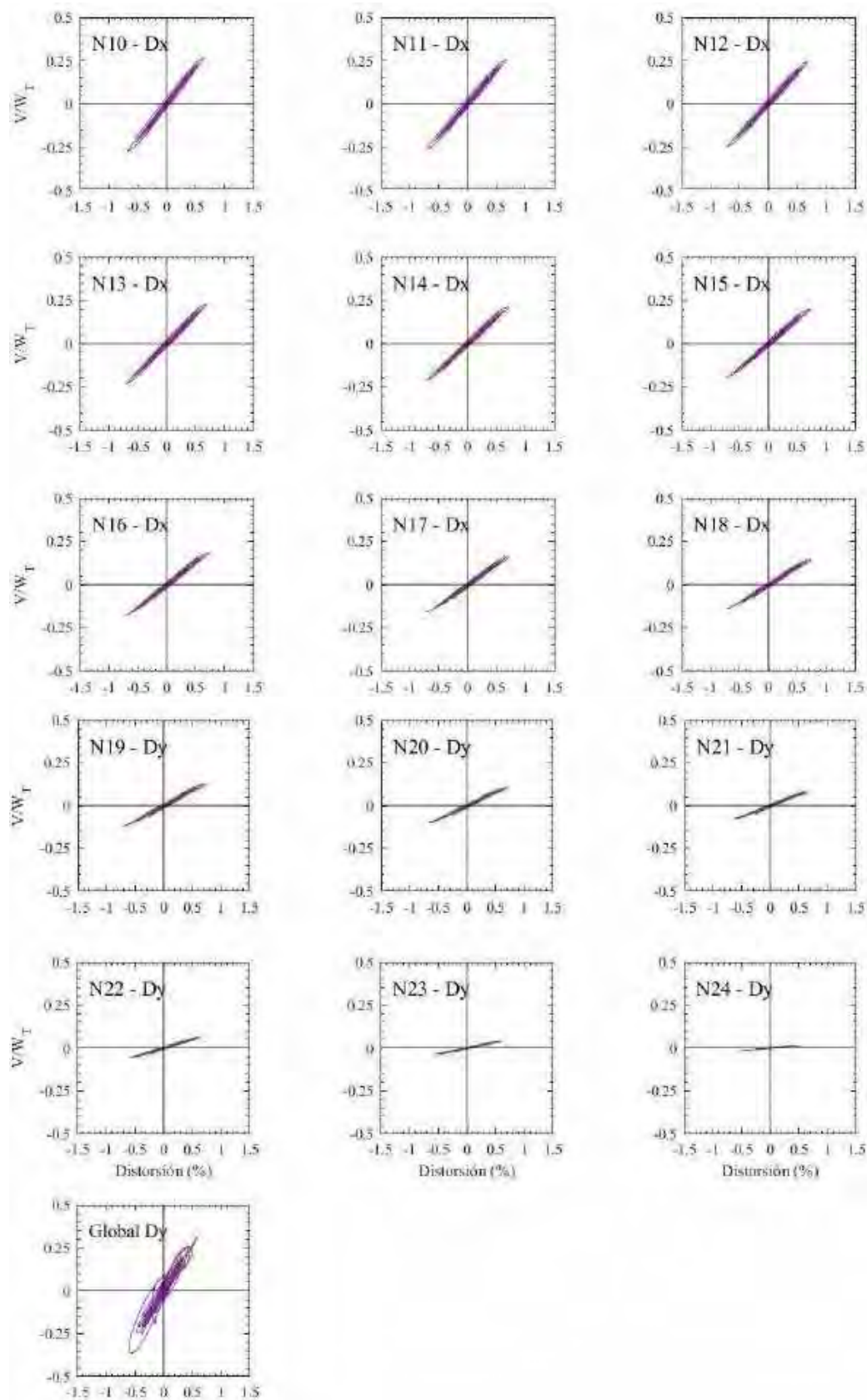
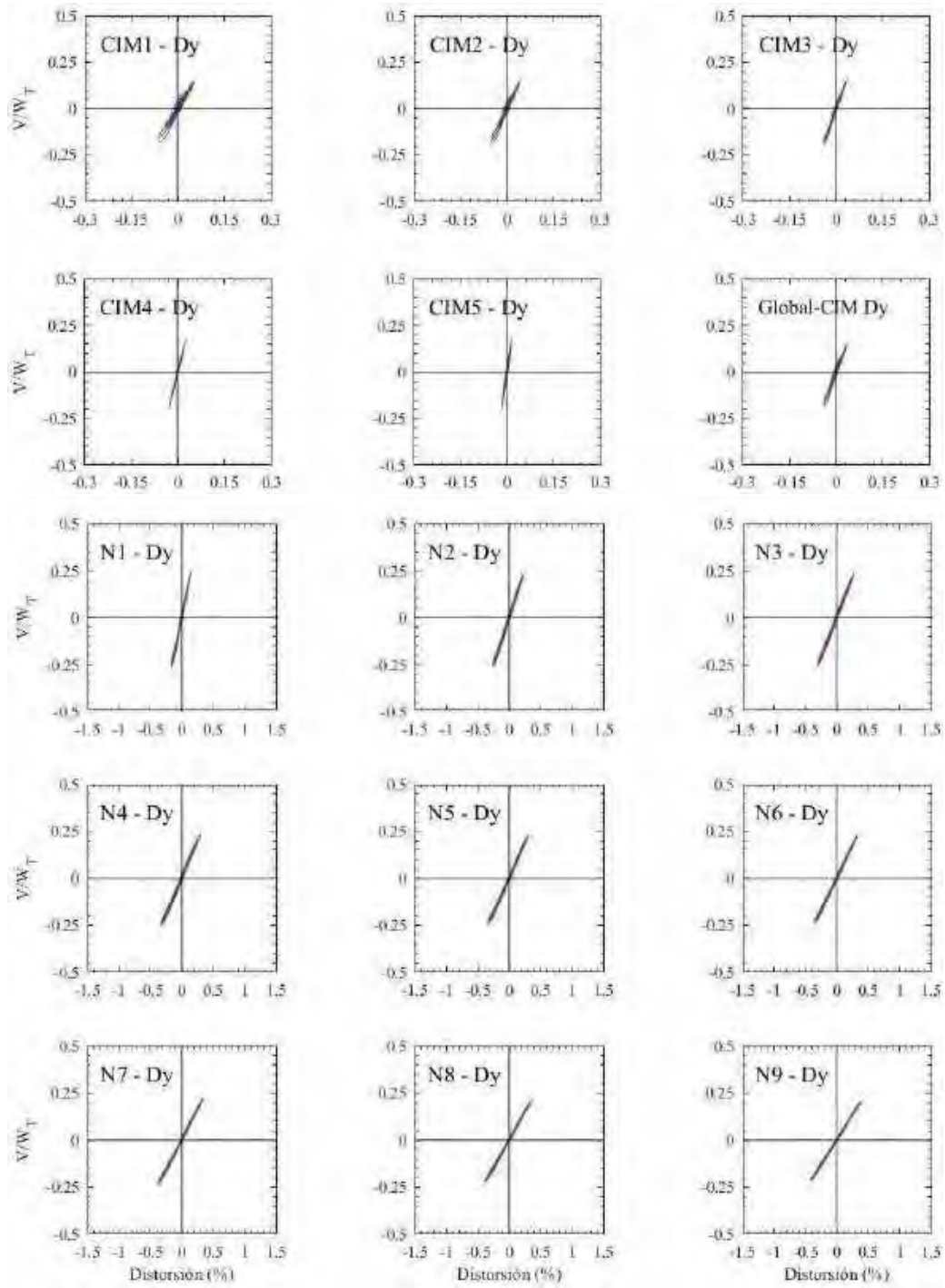


Figura H.191. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración XO36-A (2017)



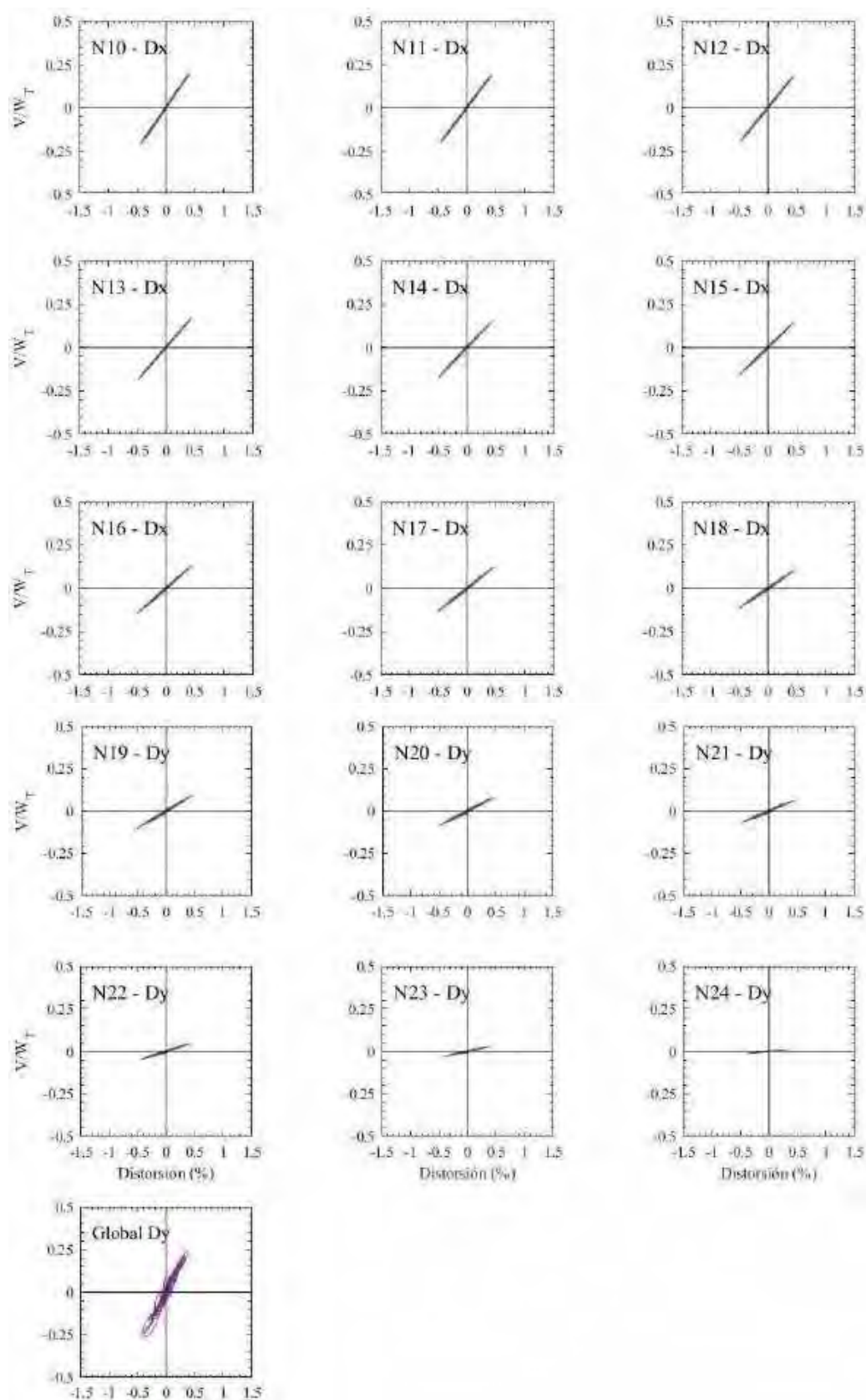


Figura H.192. Ciclos de histéresis de los entrepisos en dirección y, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.2.5 Mapeos de fluencia en dirección x

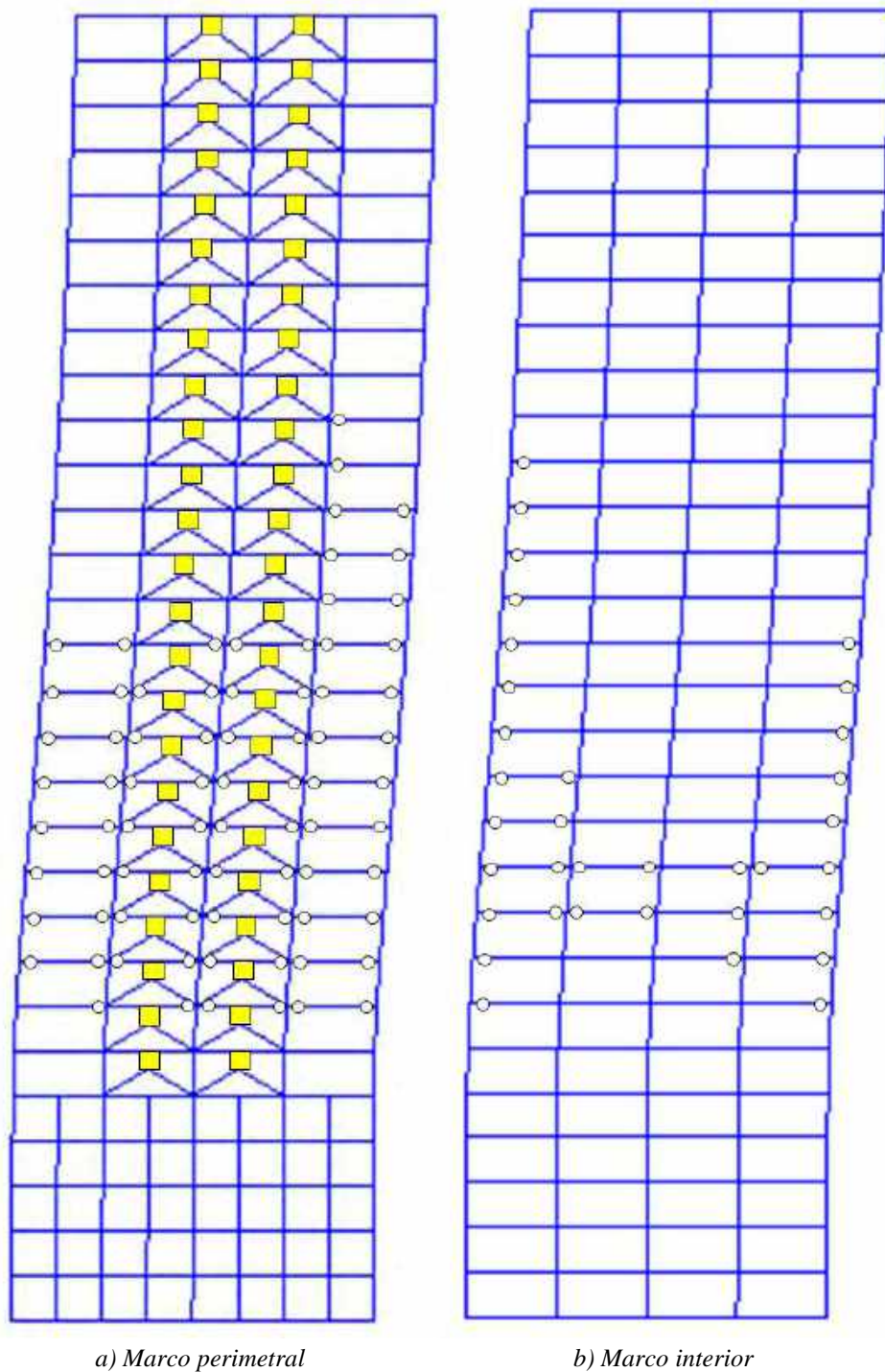
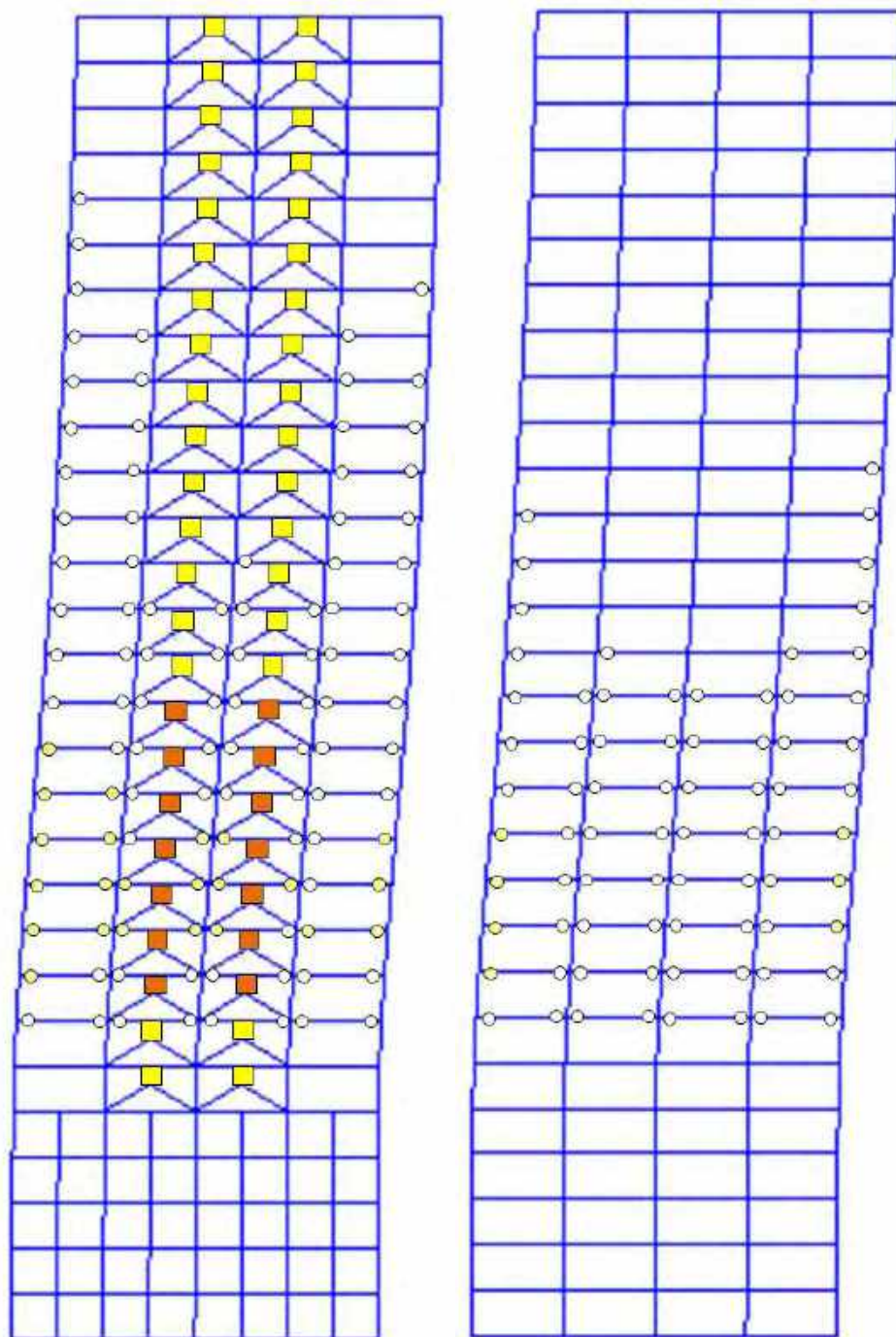


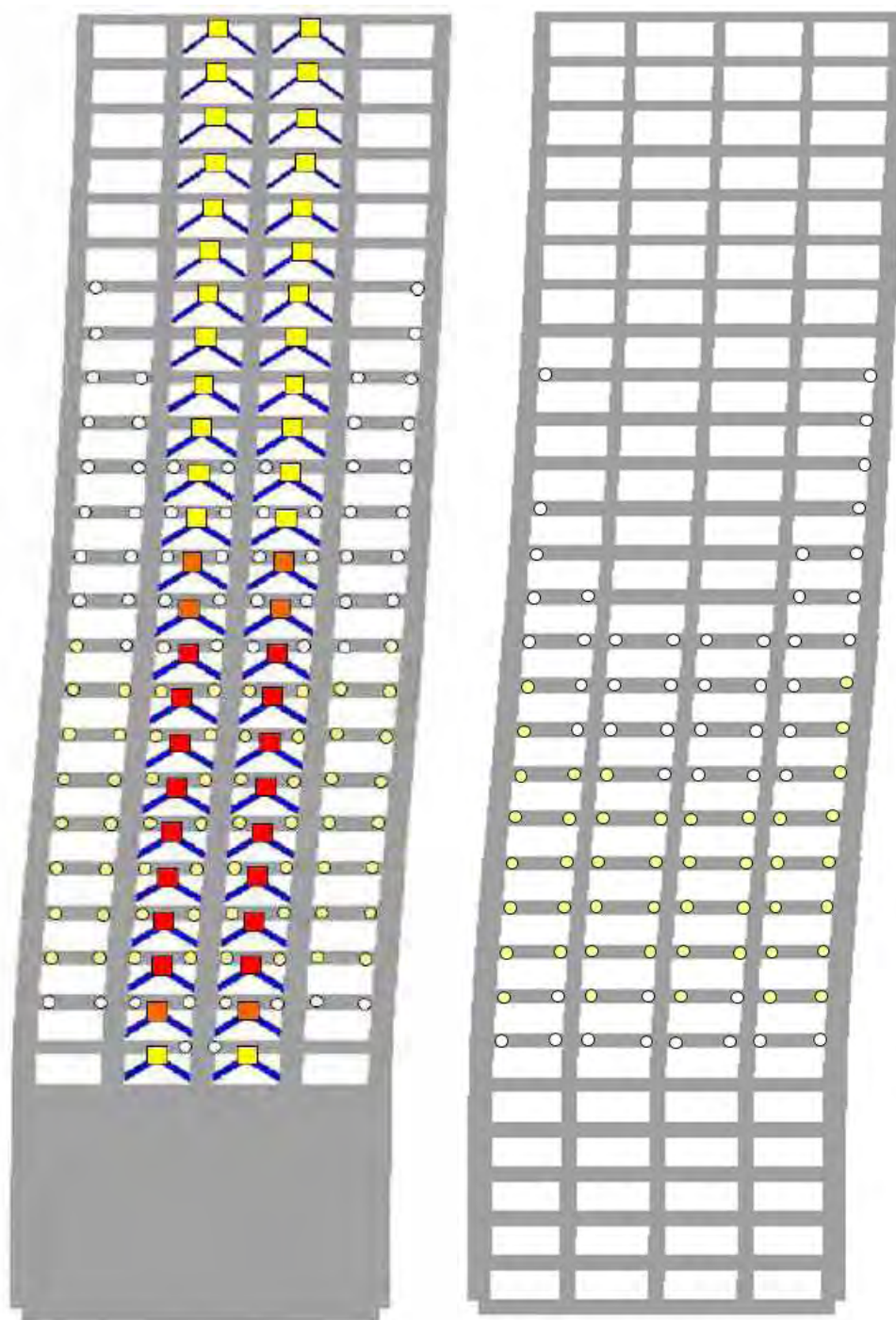
Figura H.193. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TL08-A



a) Marco perimetral

b) Marco interior

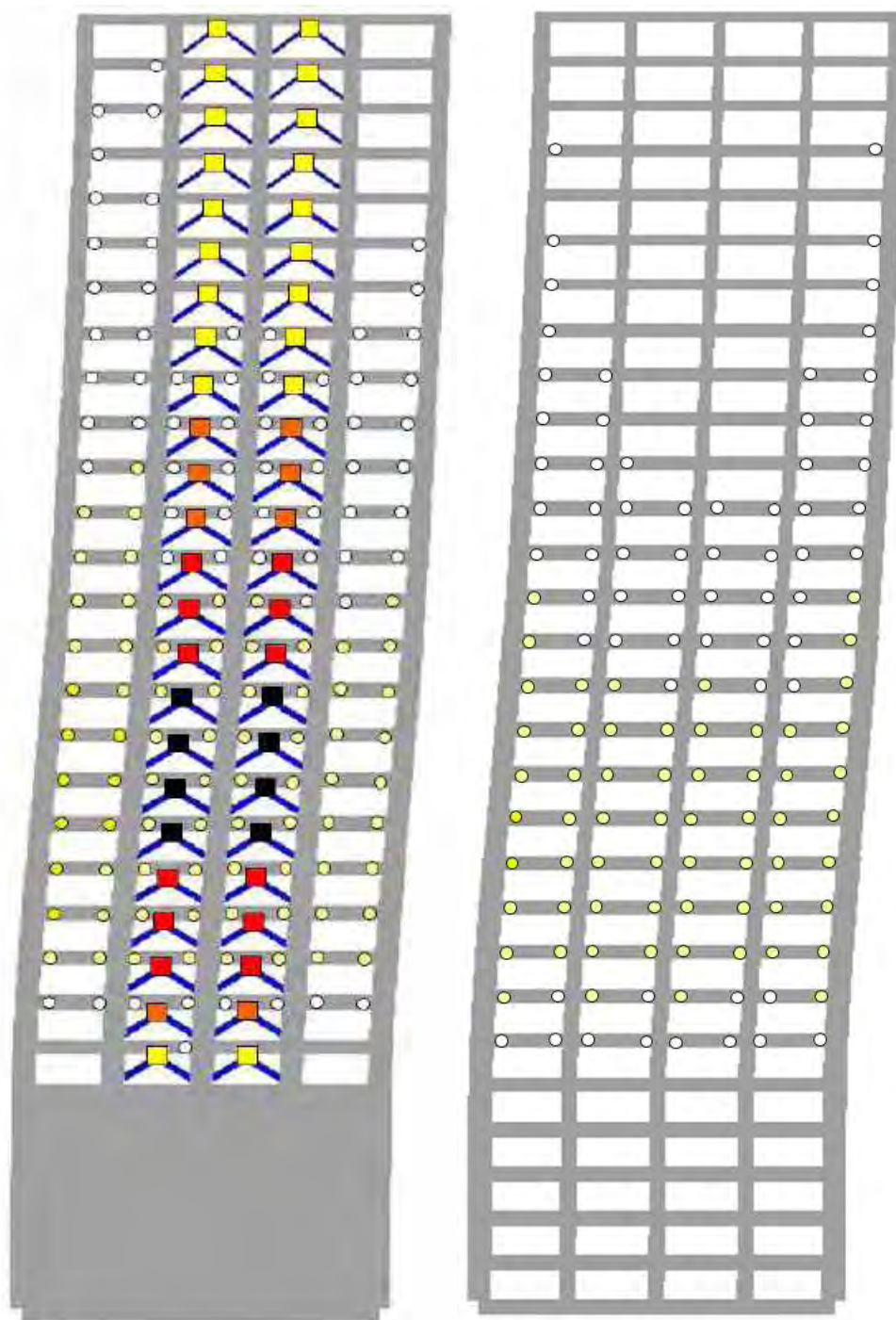
Figura H.194. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TL08-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

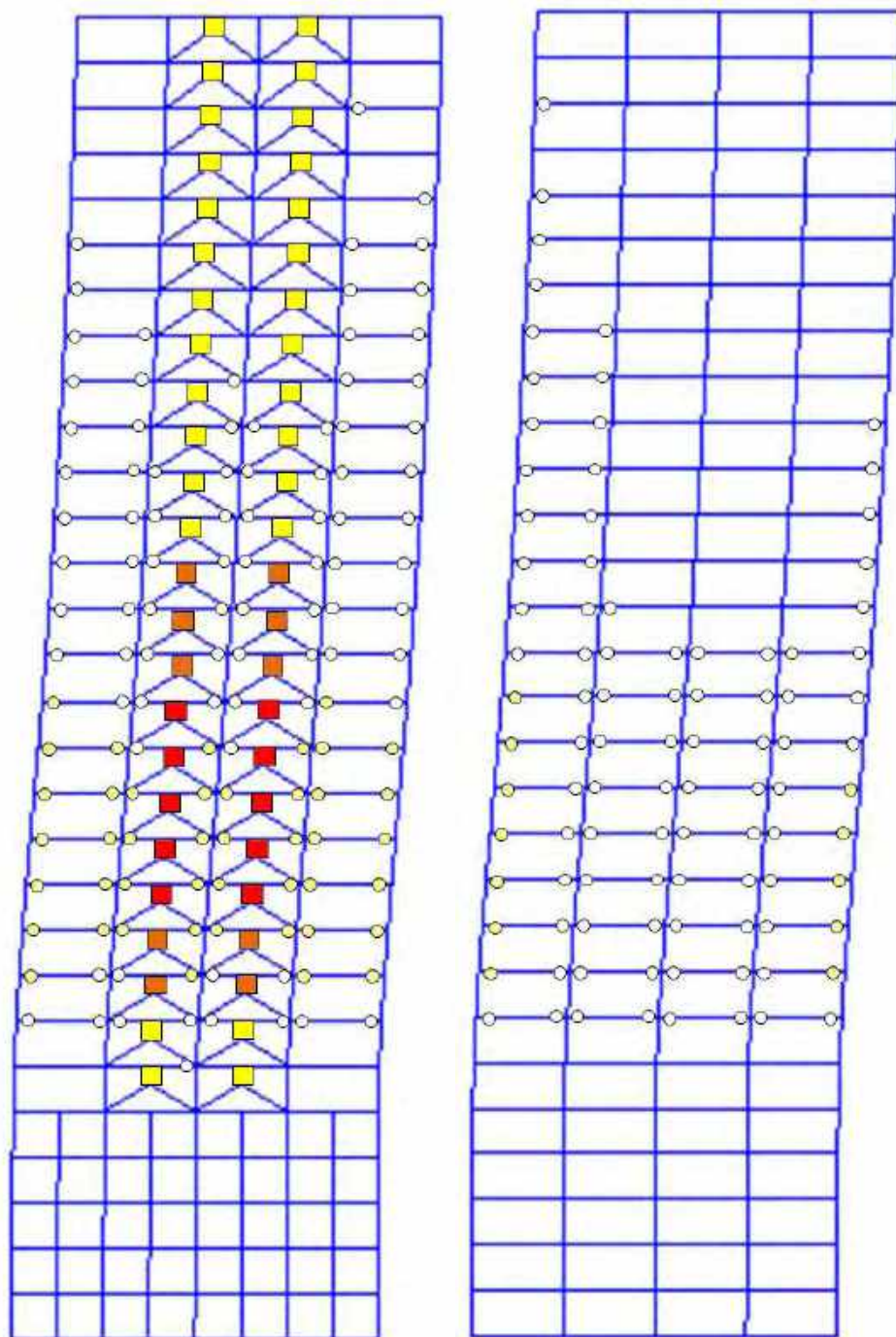
Figura H.195. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CJ03-A



a) Marco perimetral

b) Marco interior

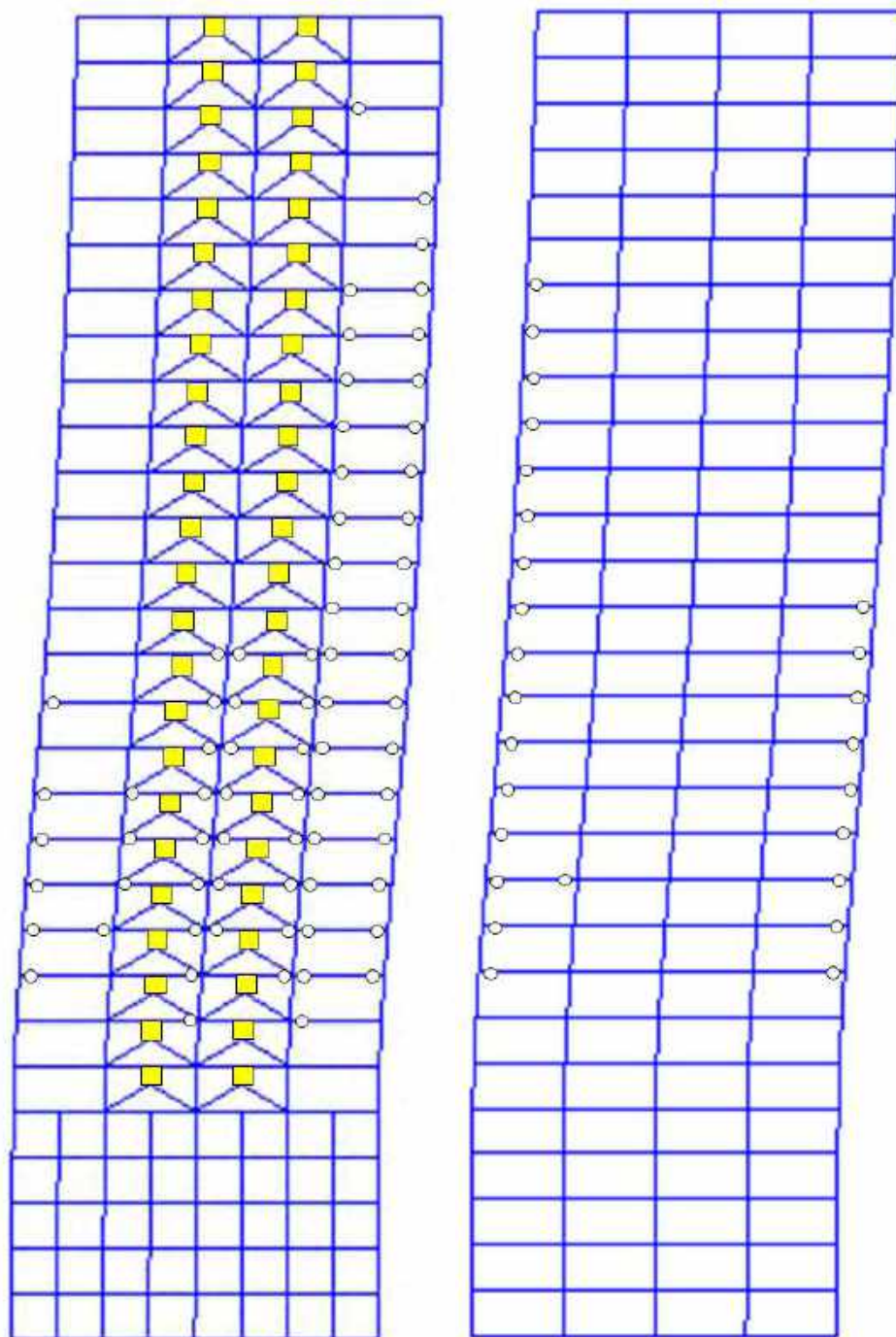
Figura H.196. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CJ03-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

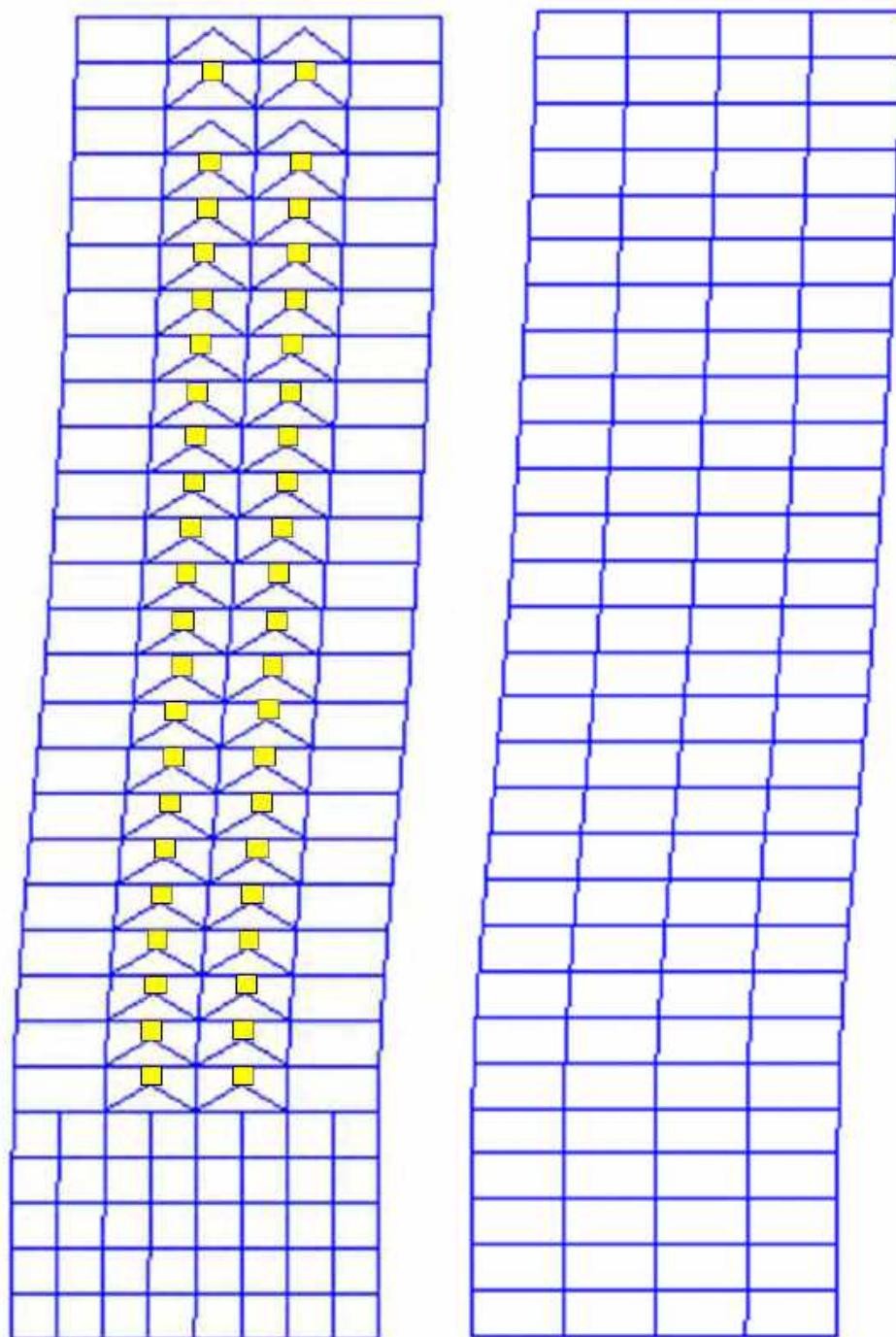
Figura H.197. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración ALAM85-A



a) Marco perimetral

b) Marco interior

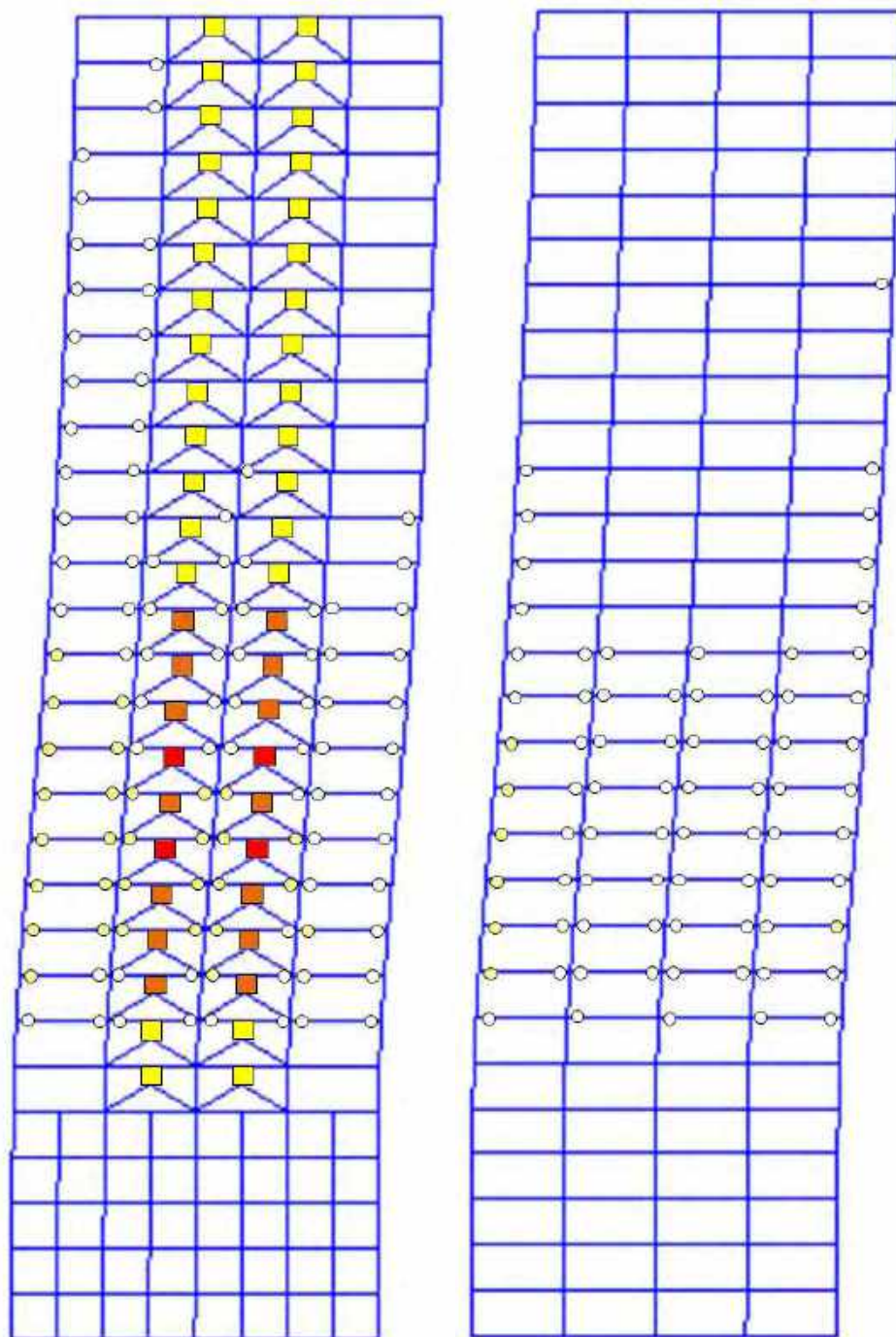
Figura H.198. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración ALAM85-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

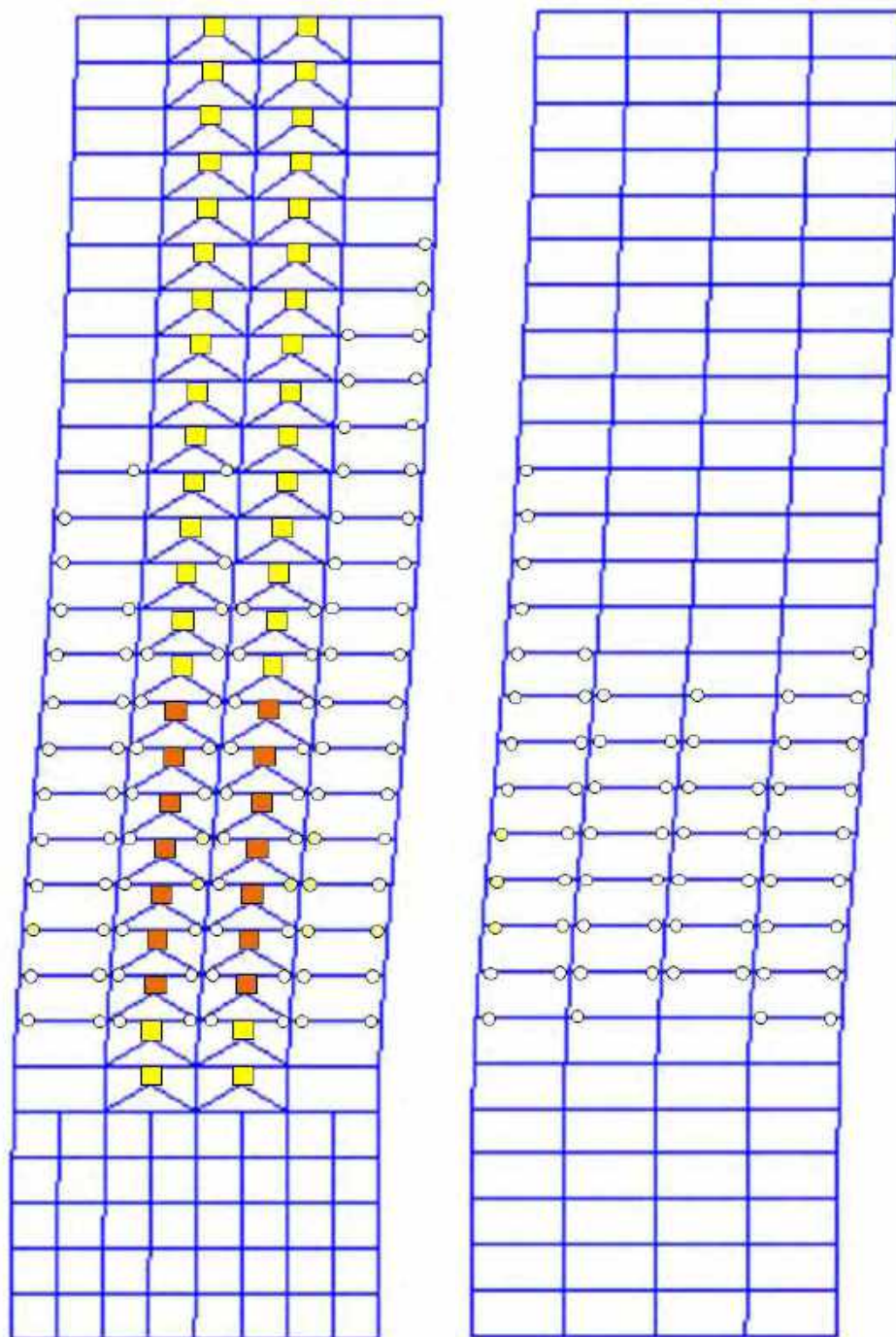
Figura H.199. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TBOM-A (1985)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

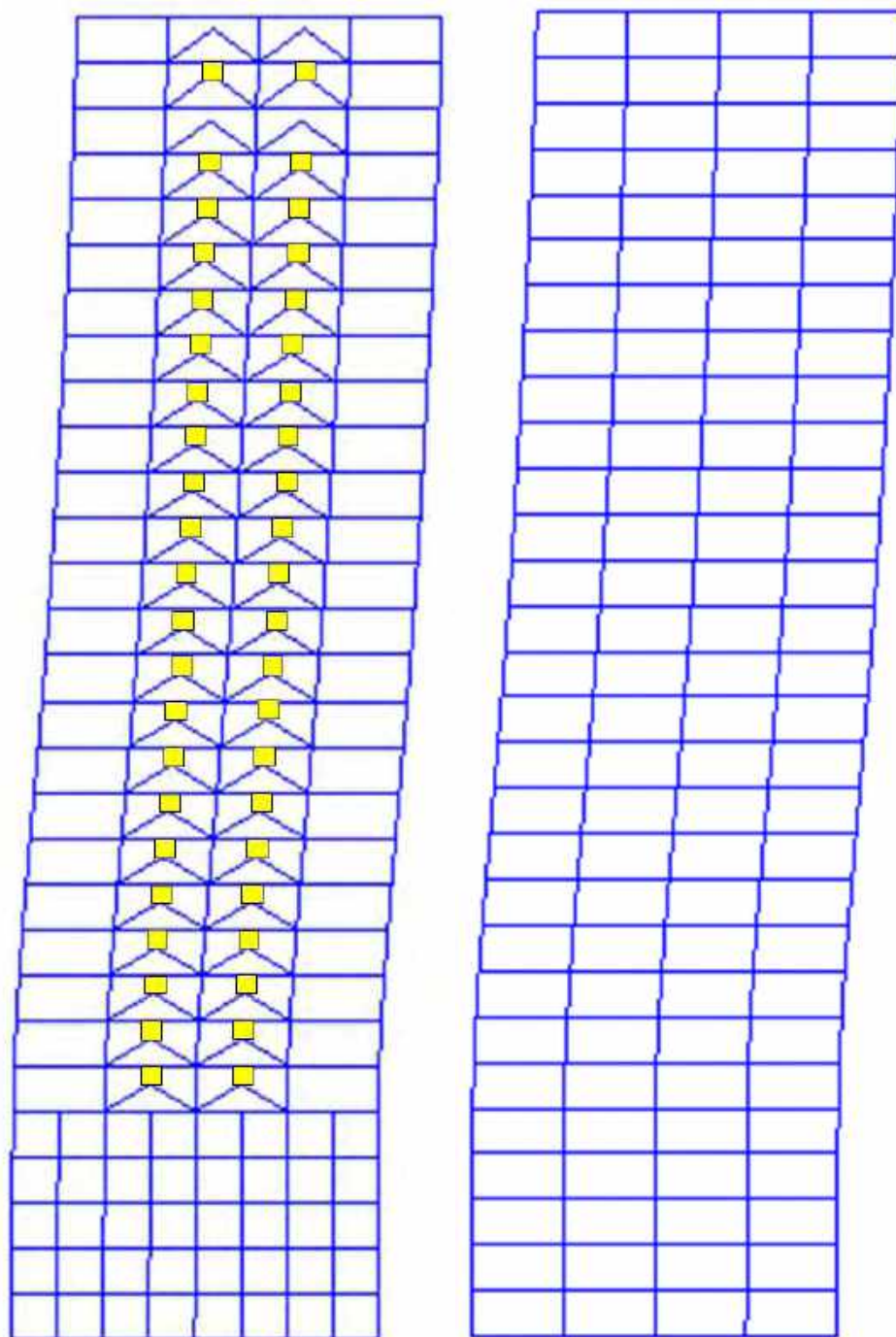
Figura H.200. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TBOM –B (1985)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

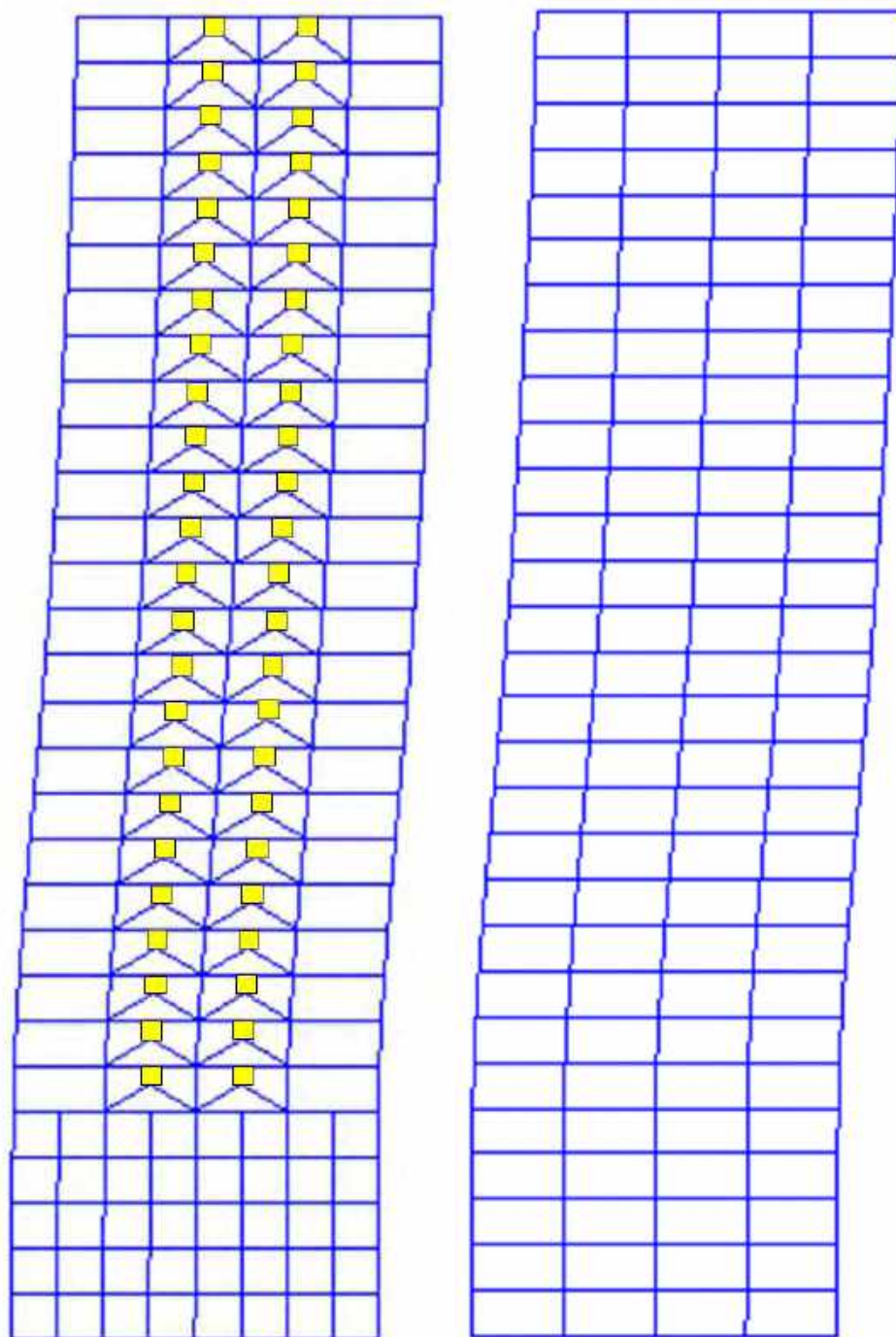
Figura H.201. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SCT185-A (1985)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

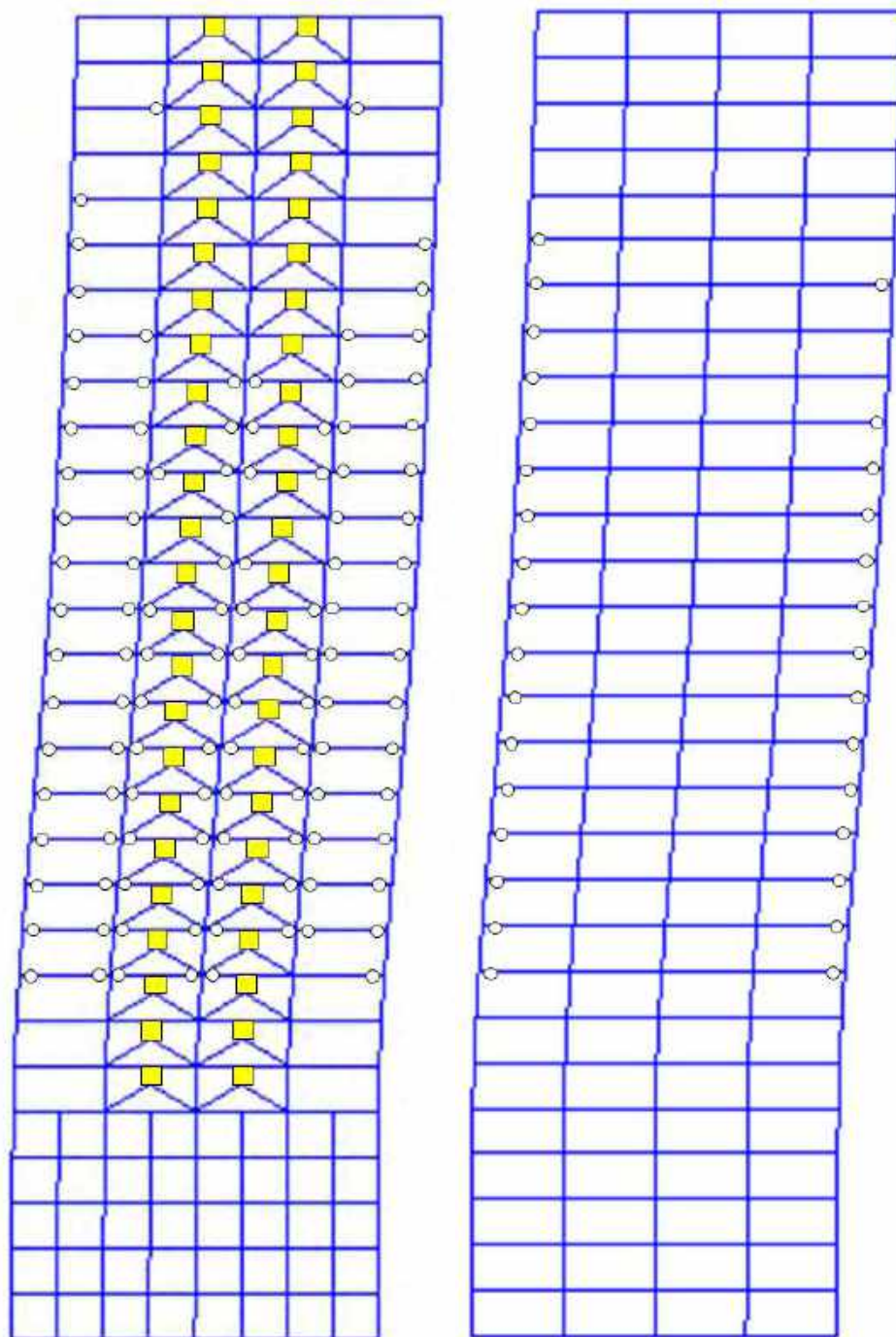
Figura H.202. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SCT185-B (1985)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

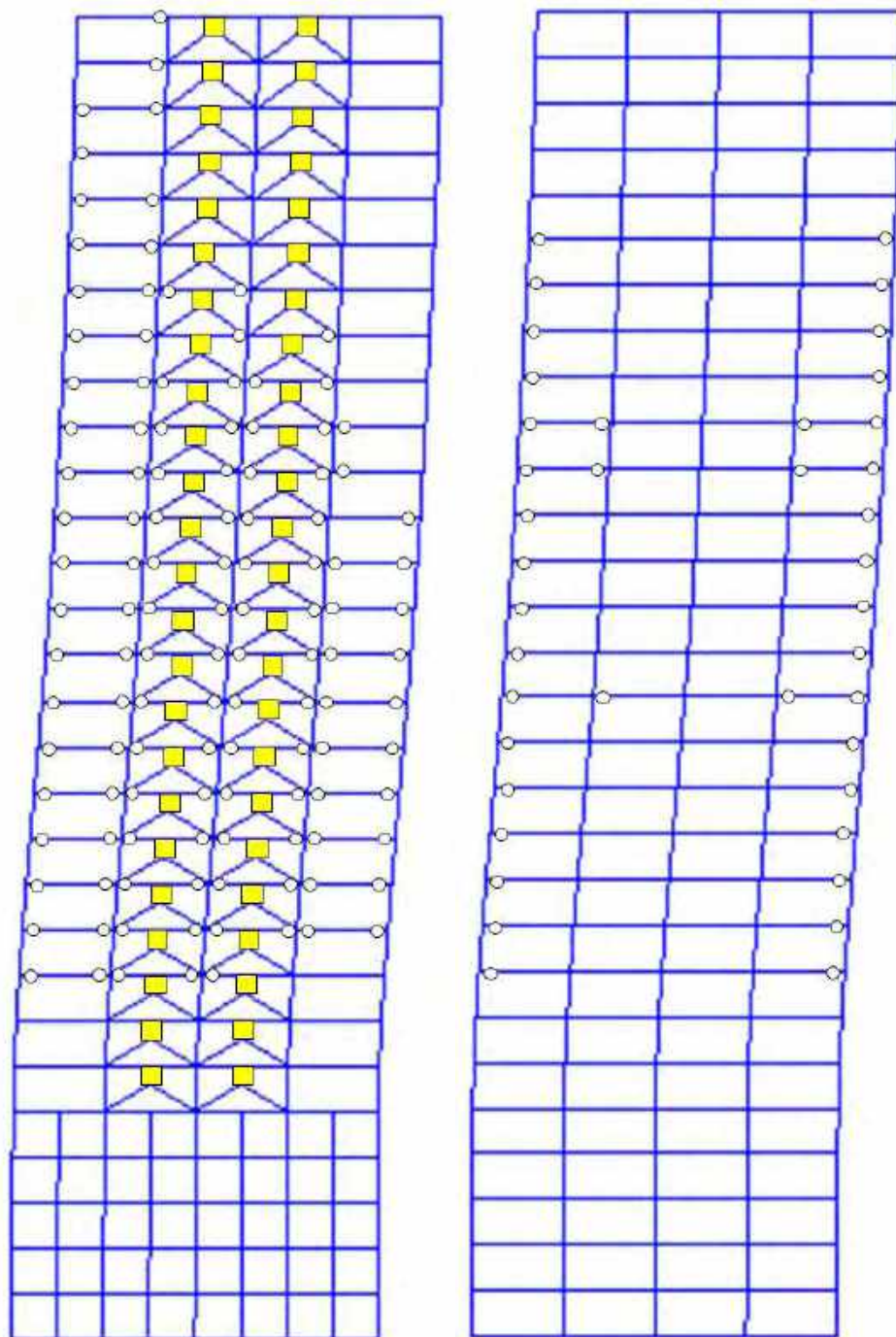
Figura H.203. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CH84-A (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

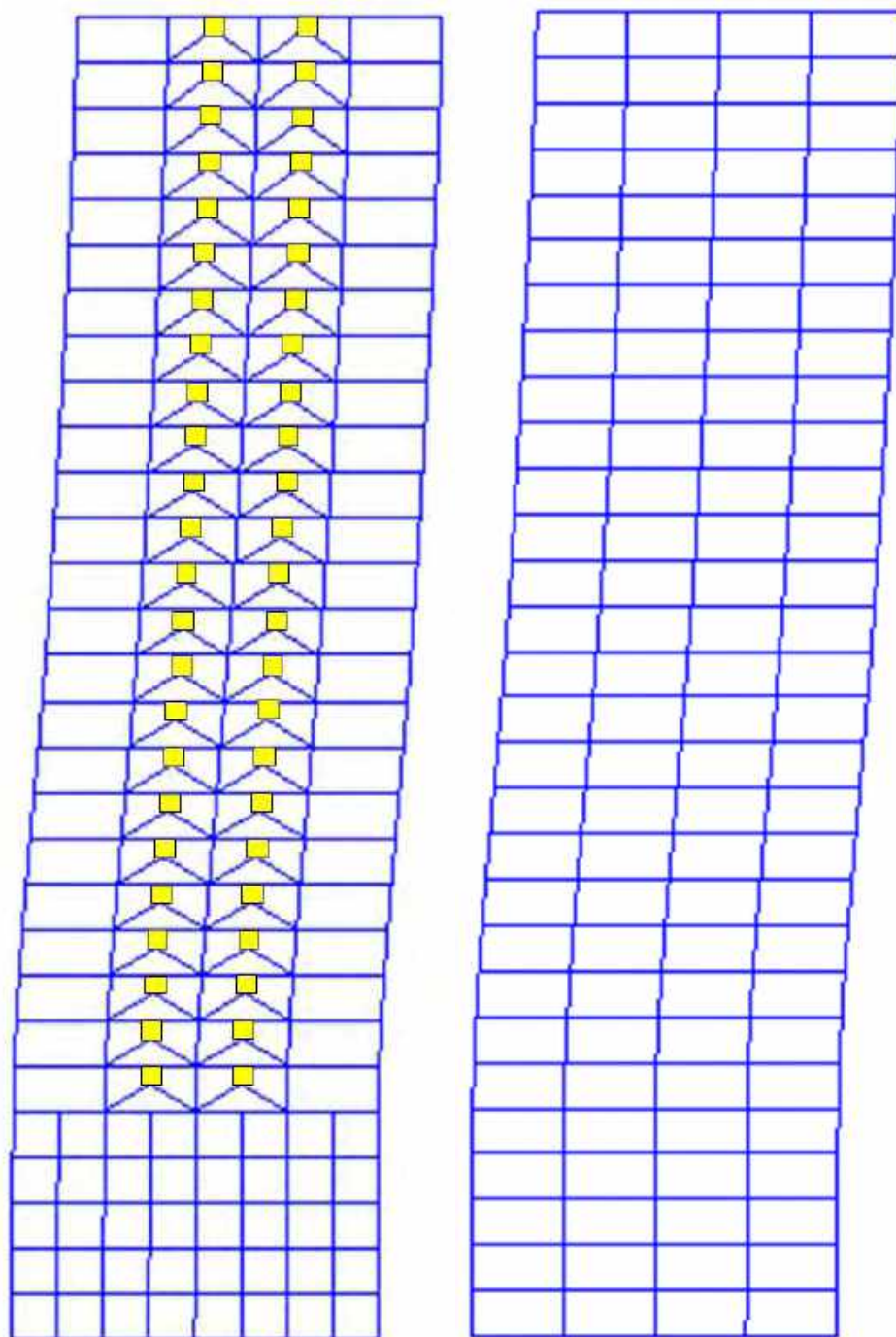
Figura H.204. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CH84-B (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

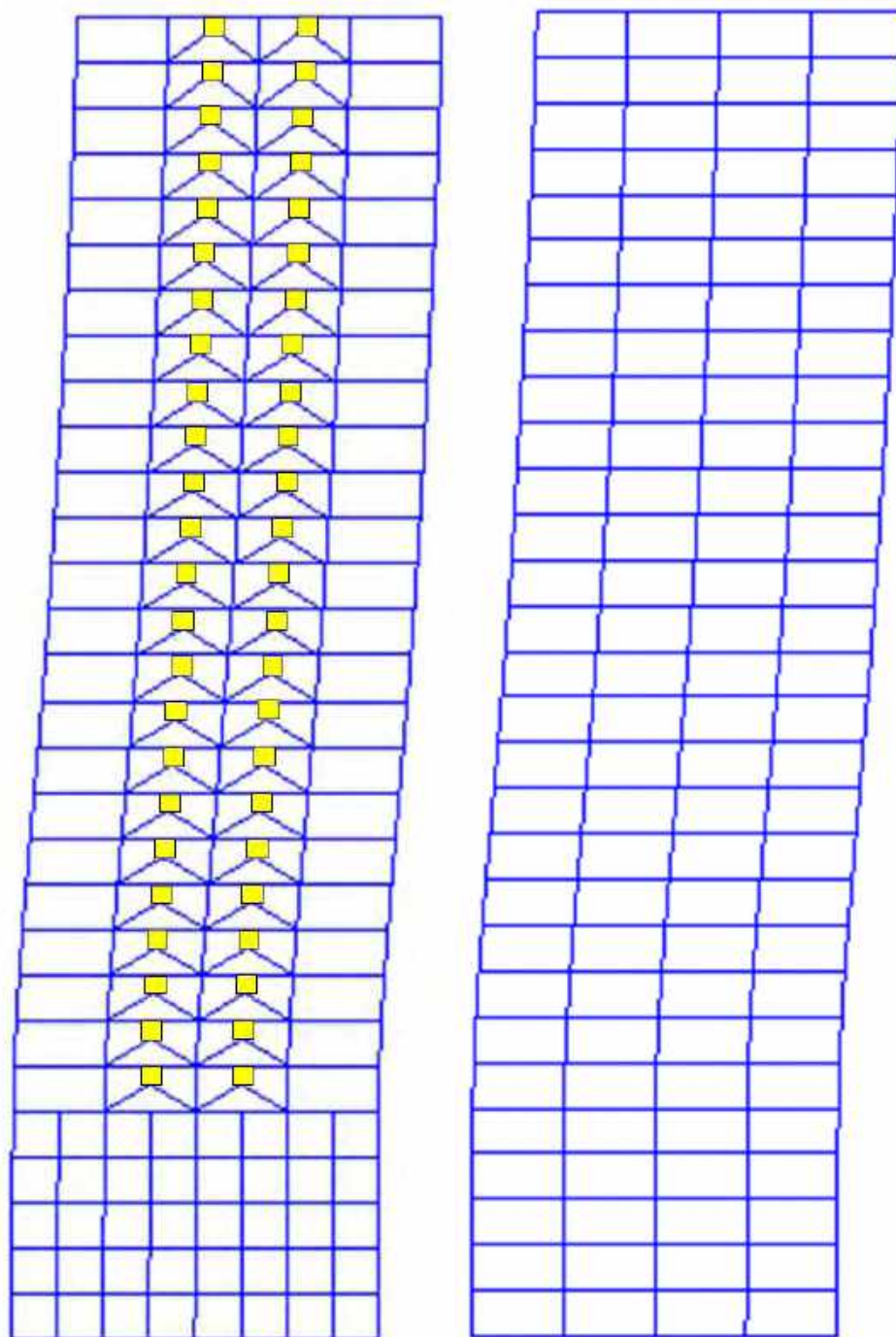
Figura H.205. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-A (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

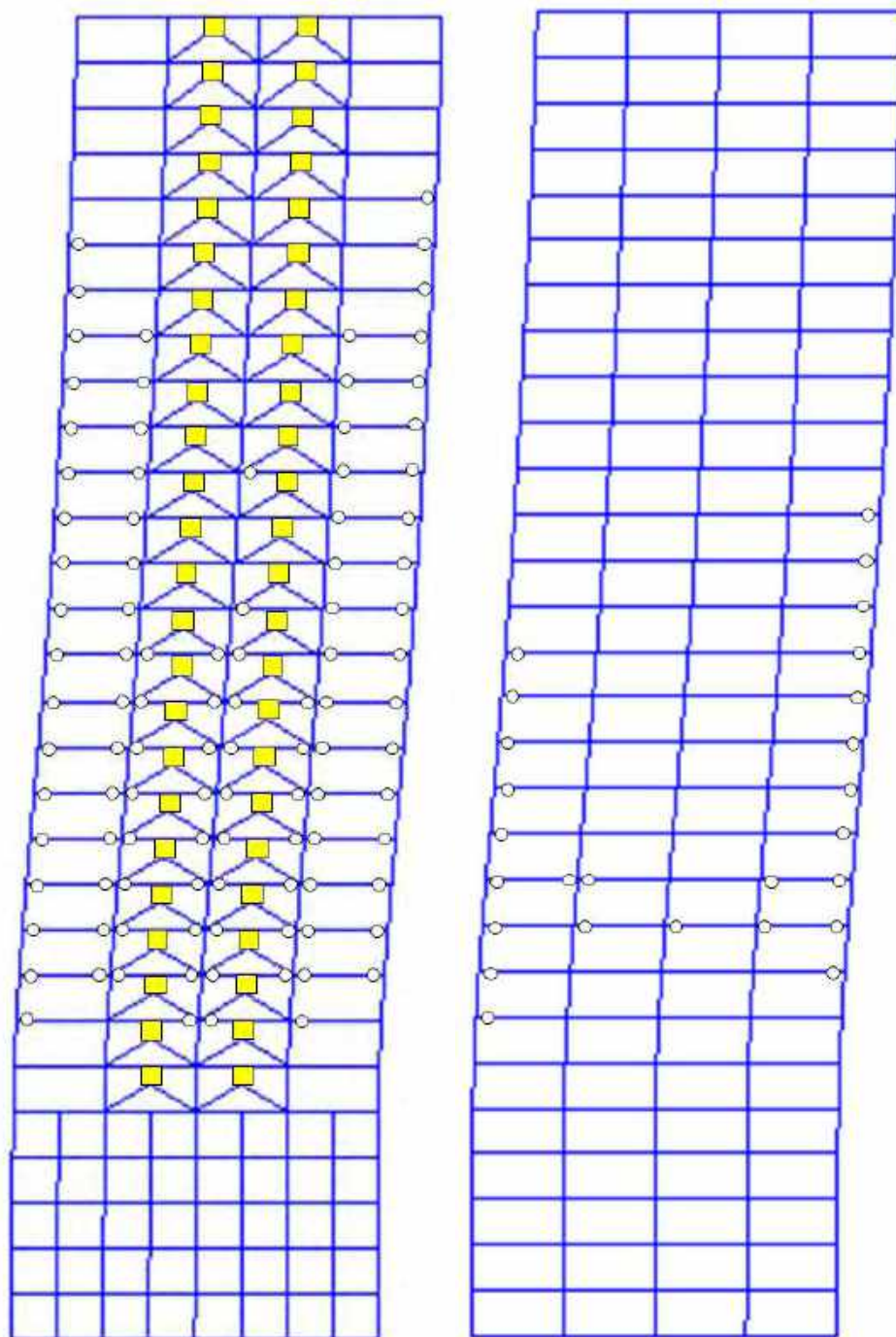
Figura H.206. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-B (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura H.207. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración XO36-A (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura H.208. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.2.6 Mapeos de fluencia en dirección y

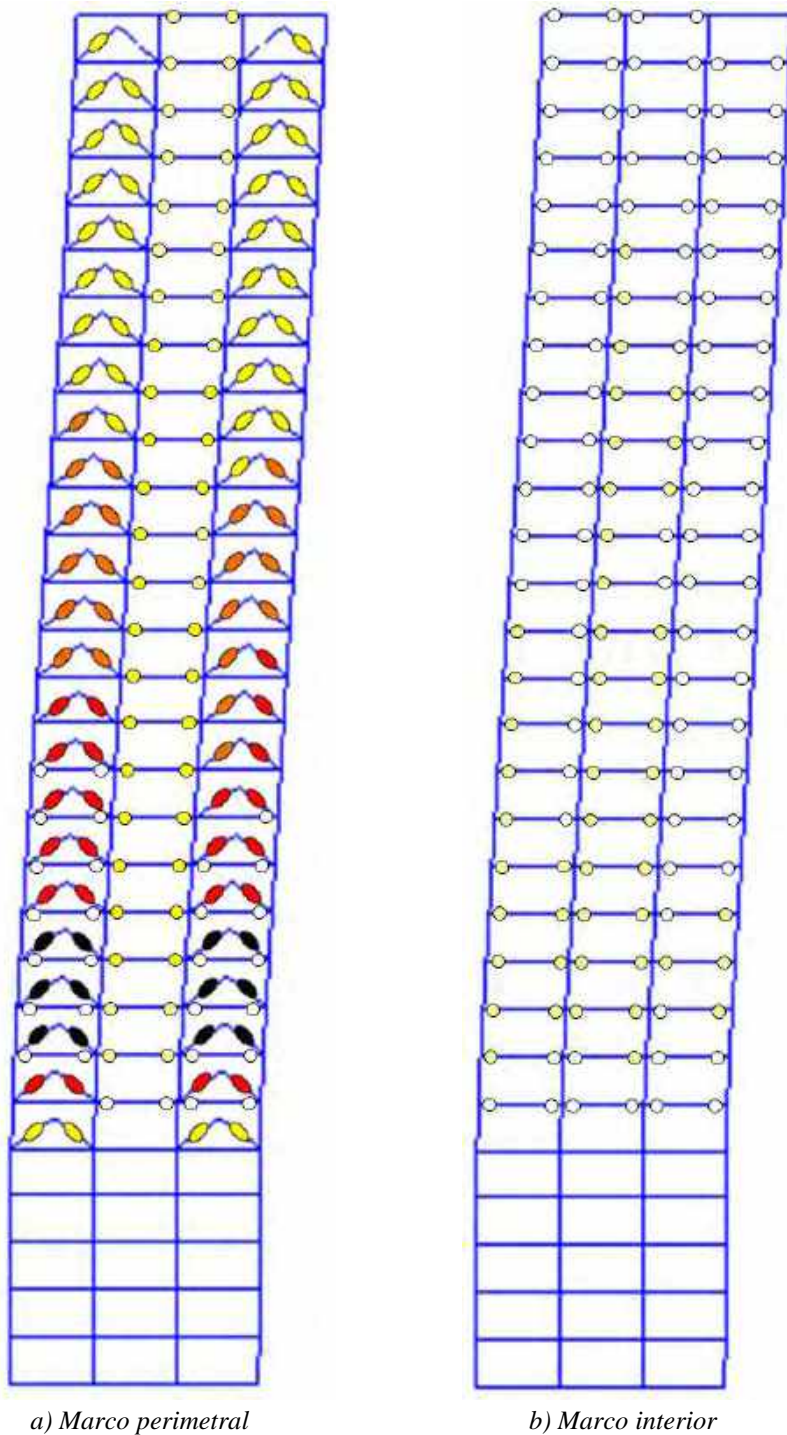
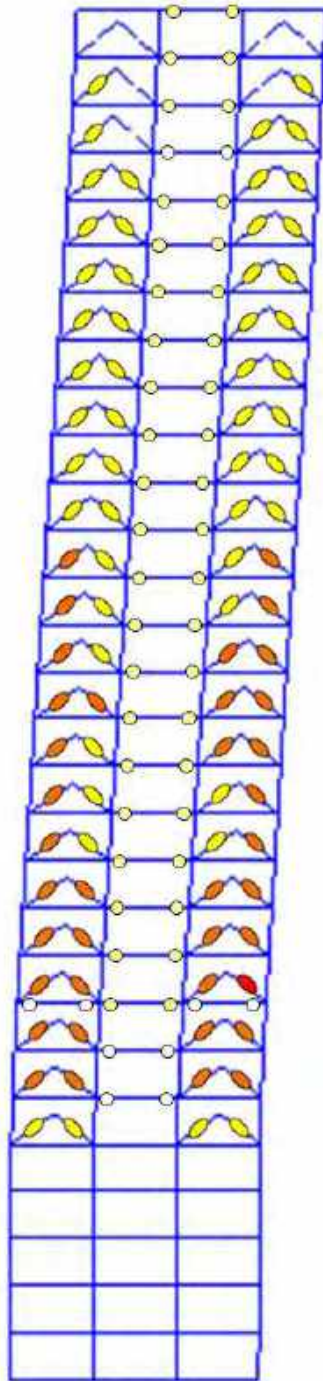
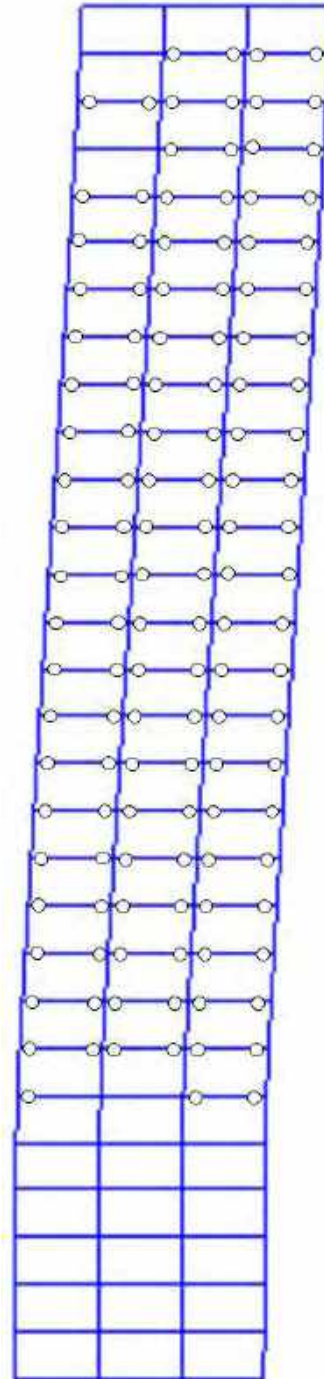


Figura H.209. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TL08-A

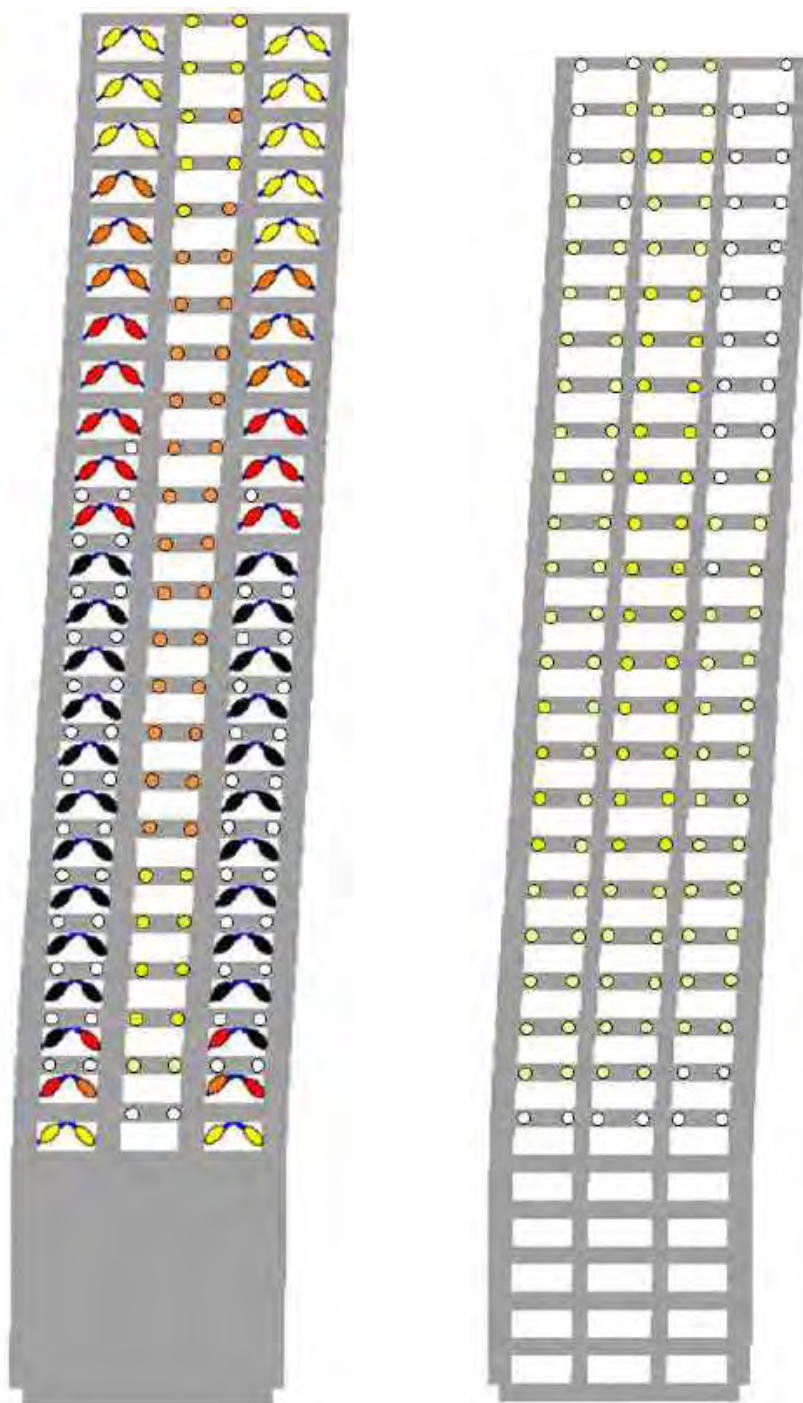


a) Marco perimetral



b) Marco interior

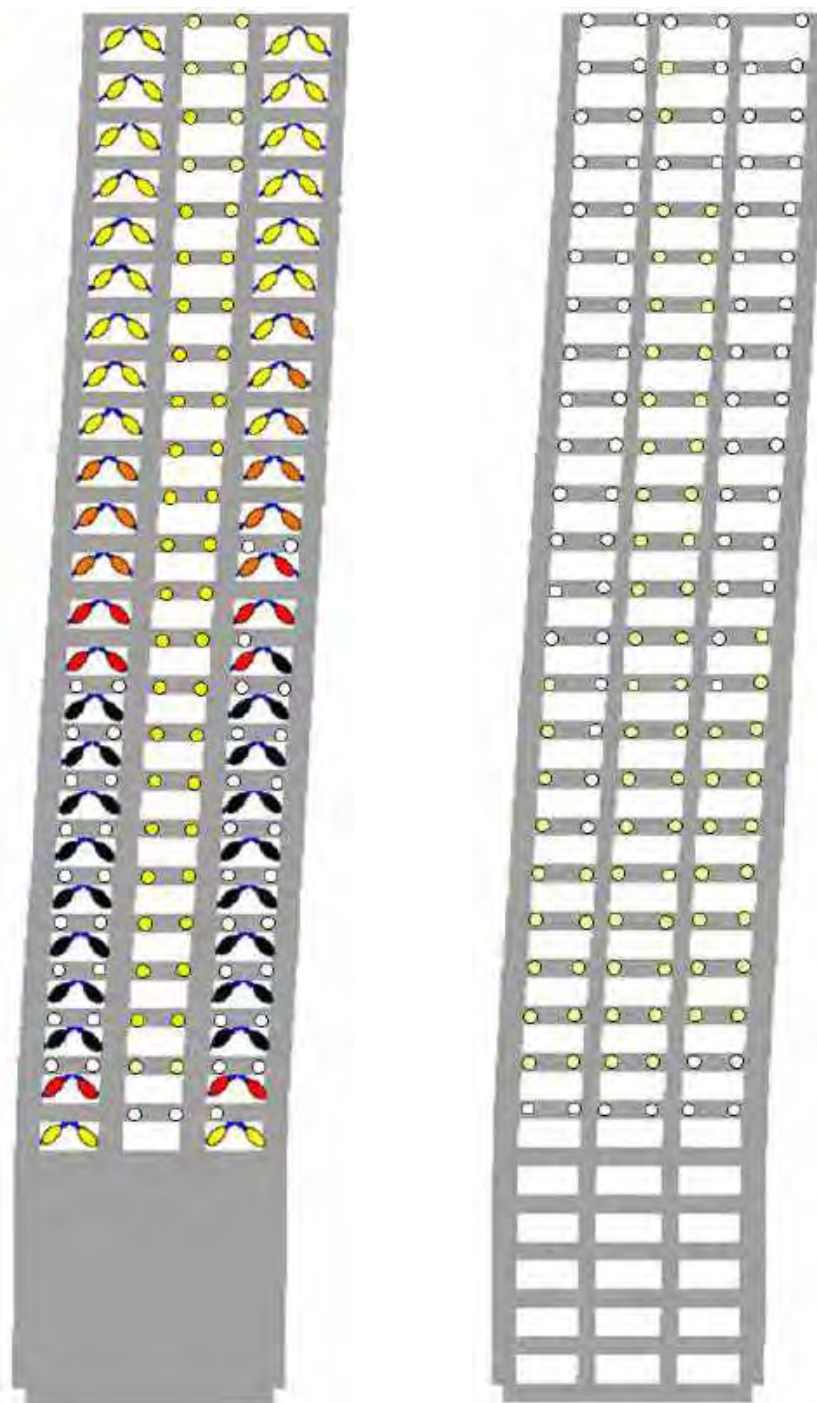
Figura H.210. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TL08-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

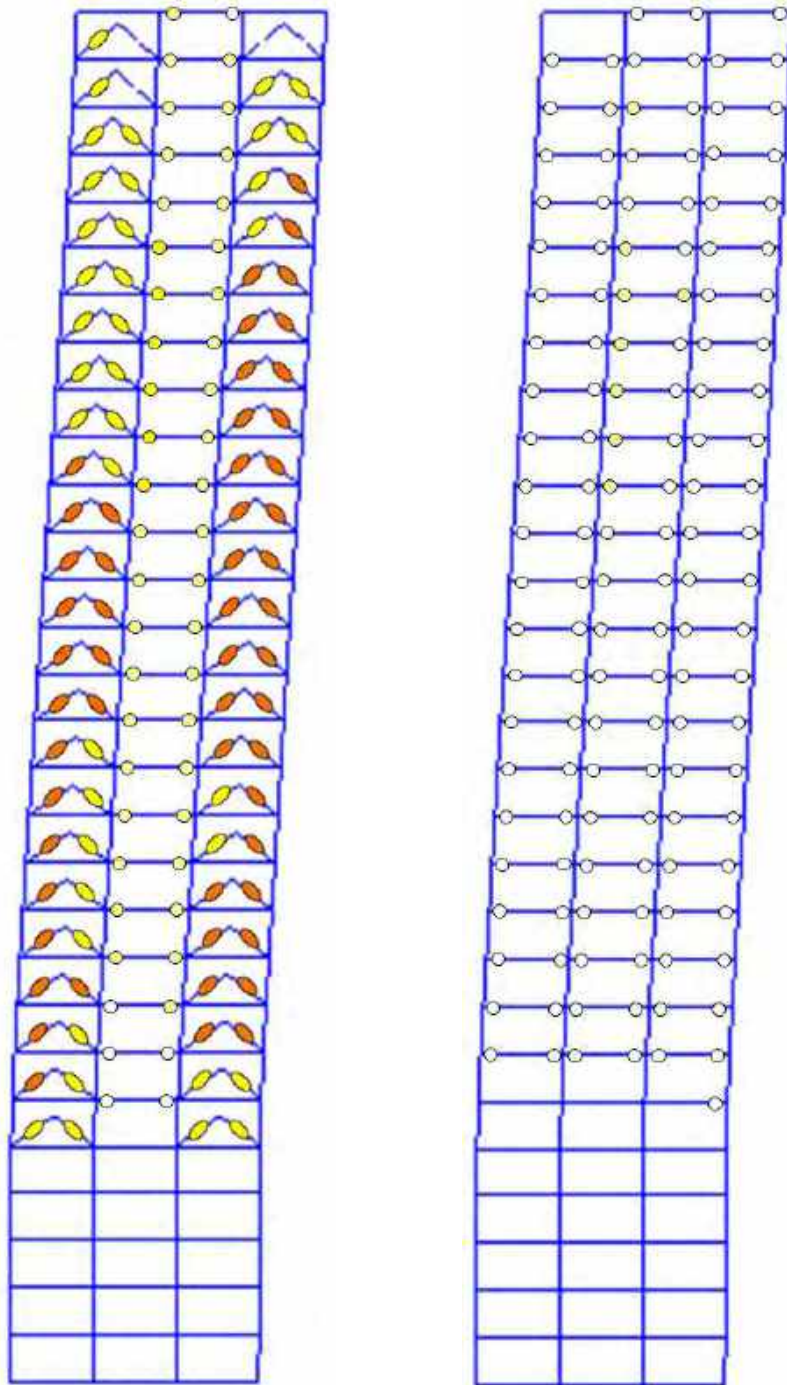
Figura H.211. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CJ03-A



a) Marco perimetral

b) Marco interior

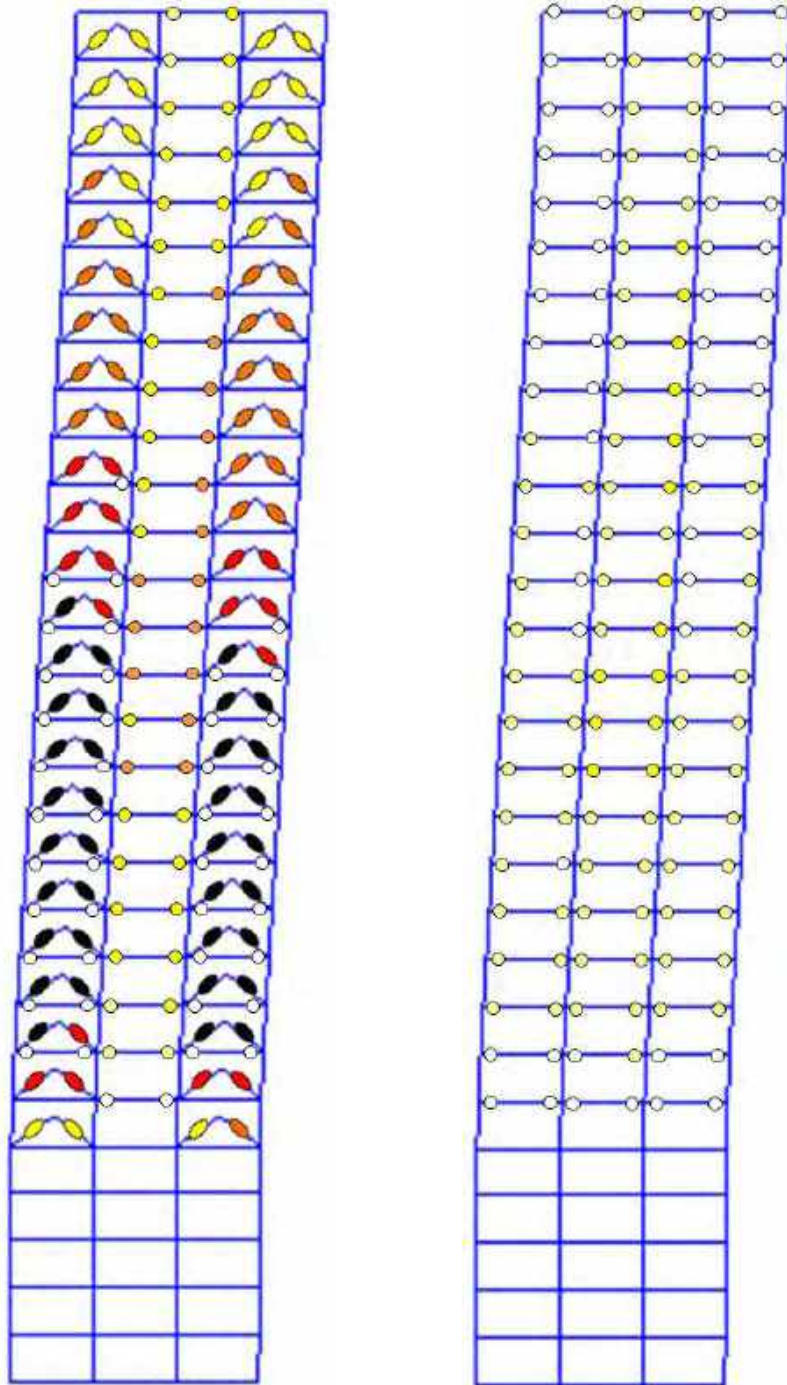
Figura H.212. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CJ03-B



a) Marco perimetral

b) Marco interior

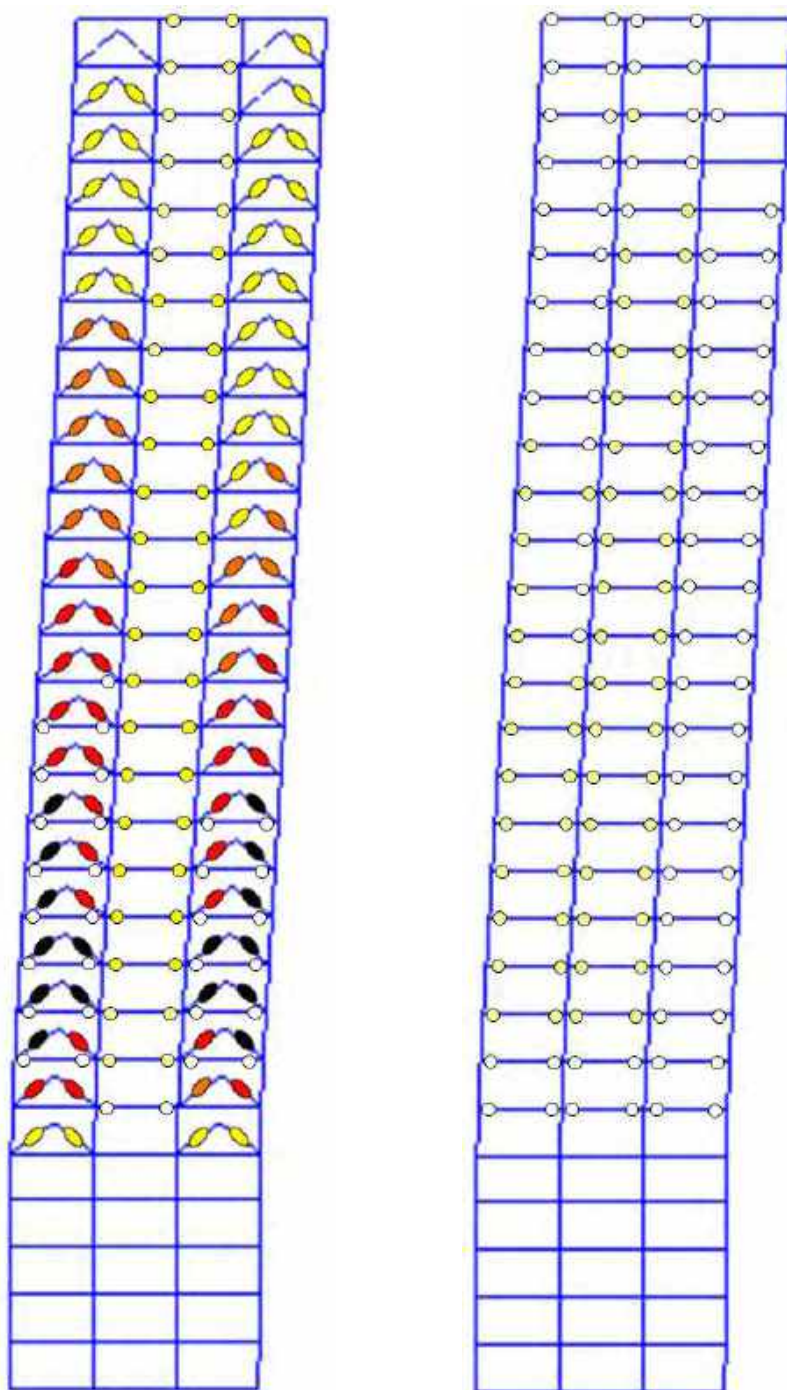
Figura H.213. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración ALAM85-A



a) Marco perimetral

b) Marco interior

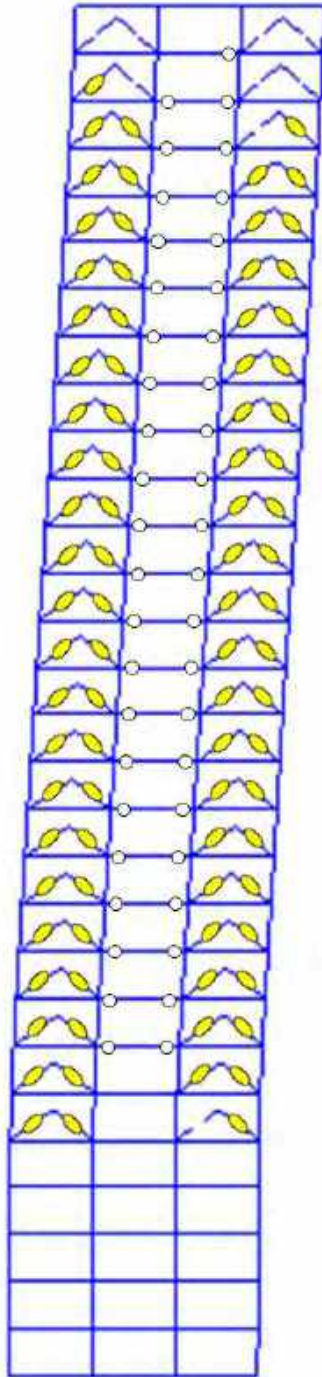
Figura H.214. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración ALAM85-B



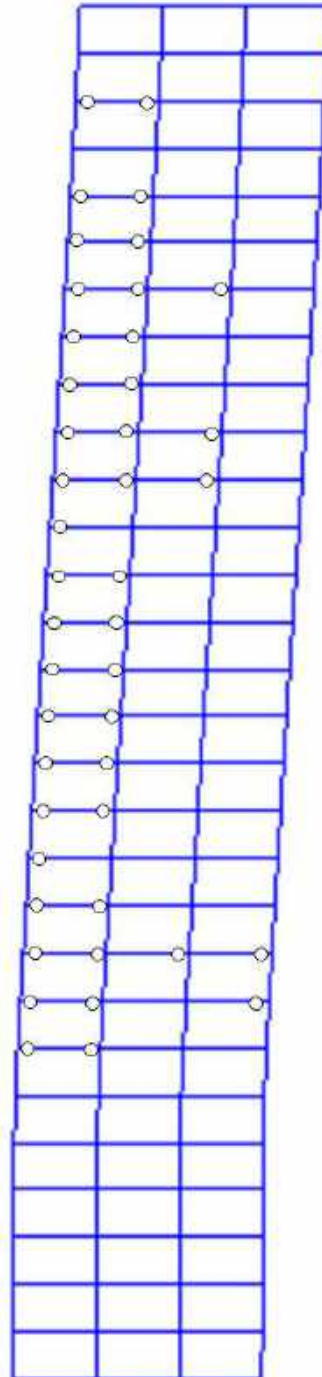
a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura H.215. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TBOM-A (1985)

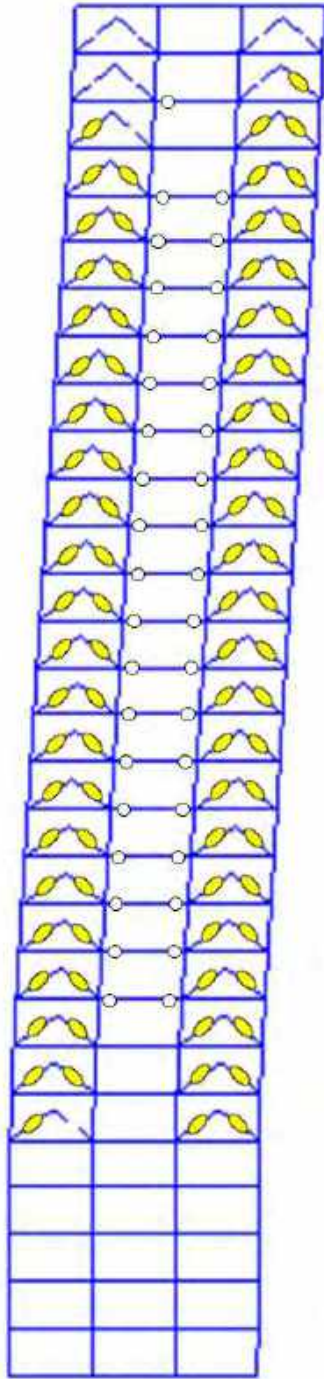


a) Marco perimetral

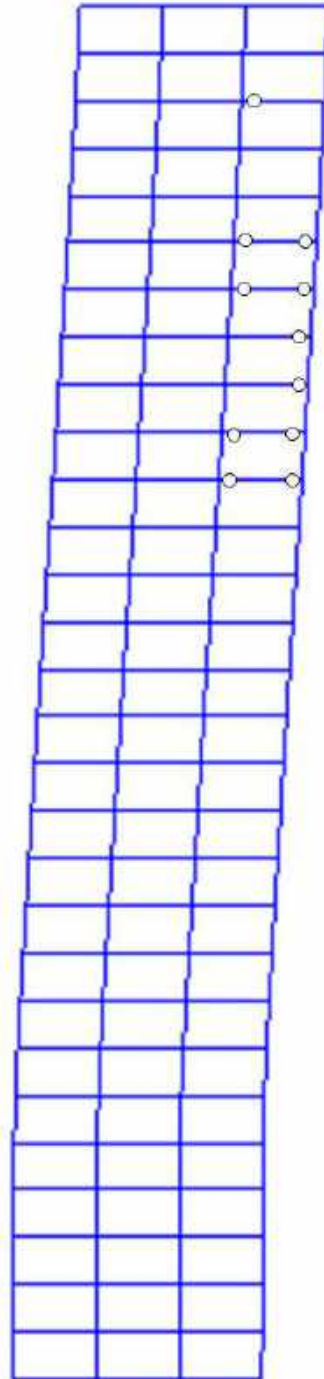


b) Marco interior

Figura H.216. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración TBOM –B (1985)

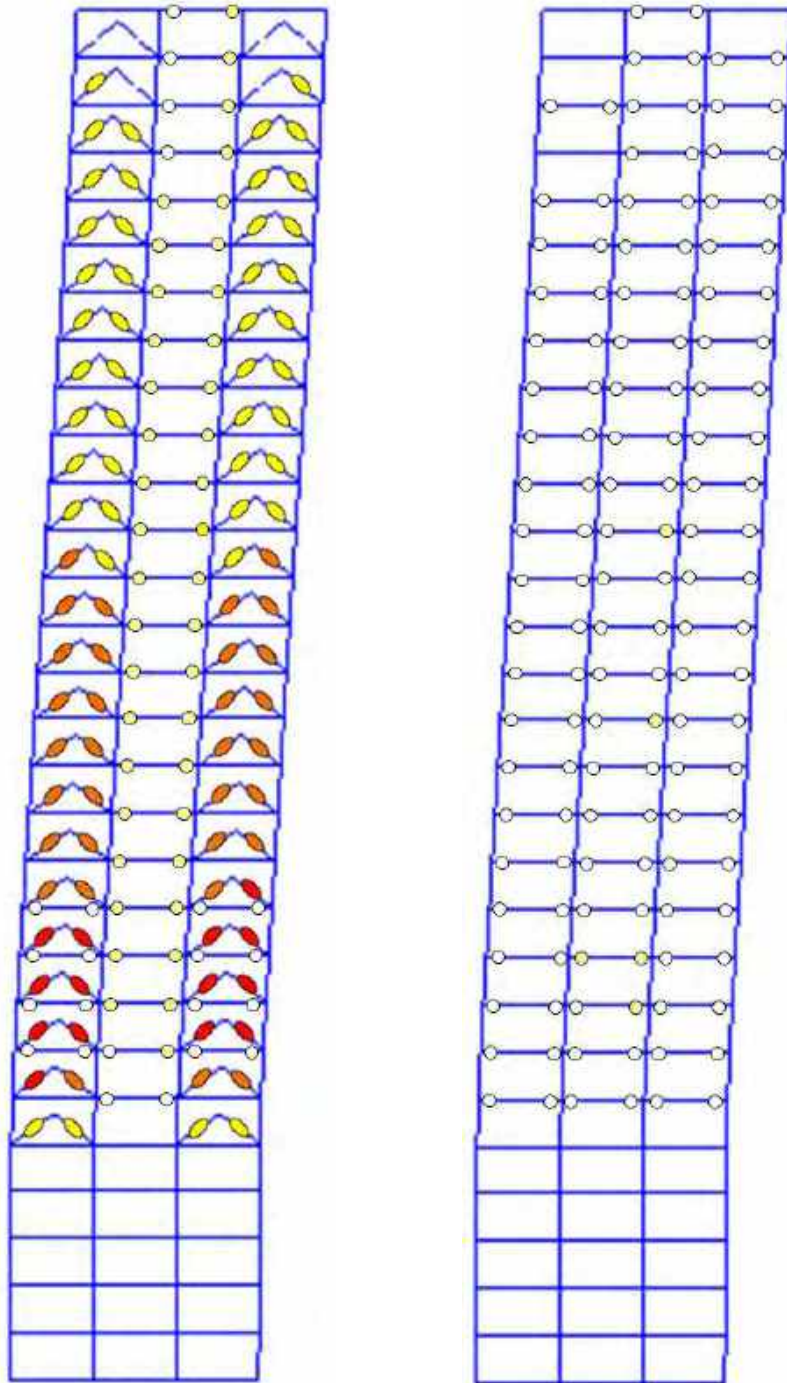


a) Marco perimetral



b) Marco interior

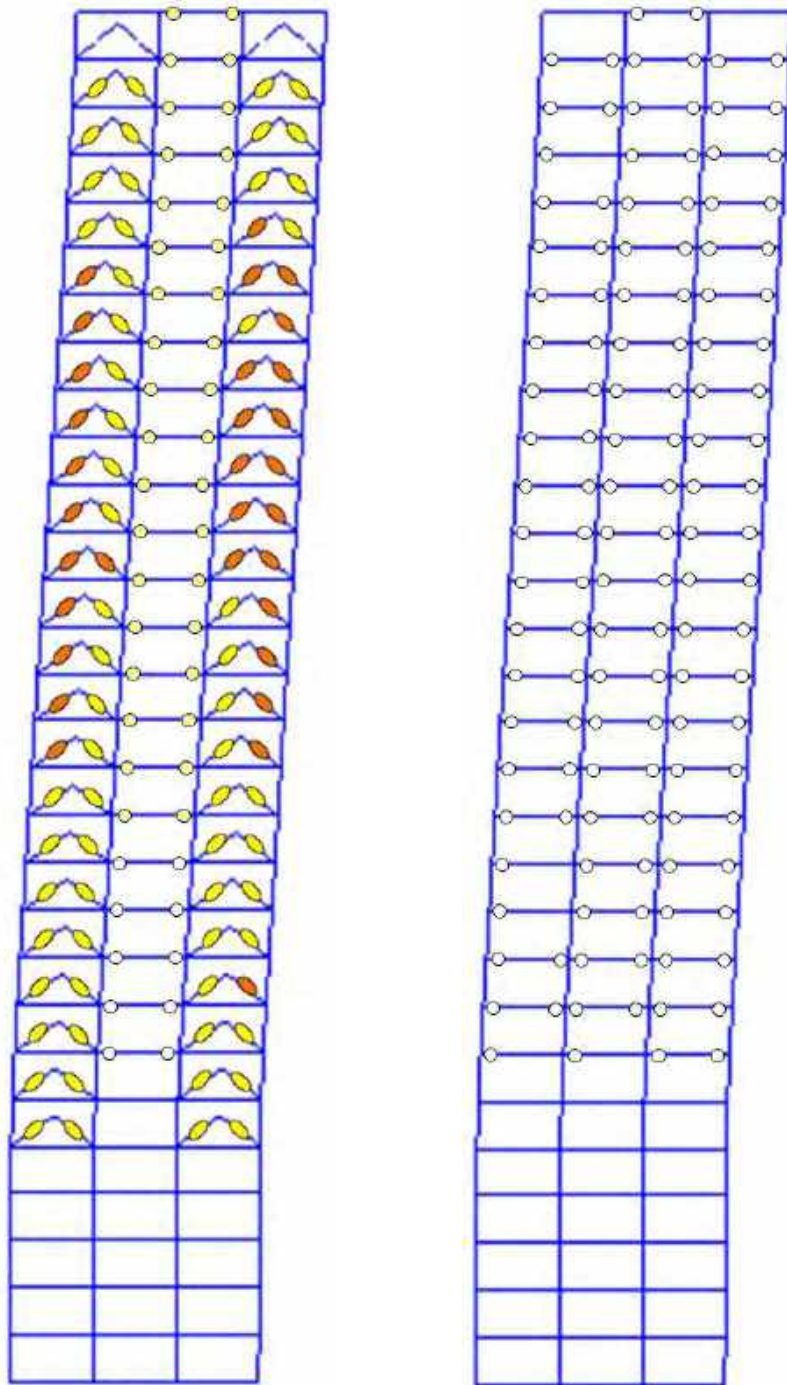
Figura H.217. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SCT185-A (1985)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

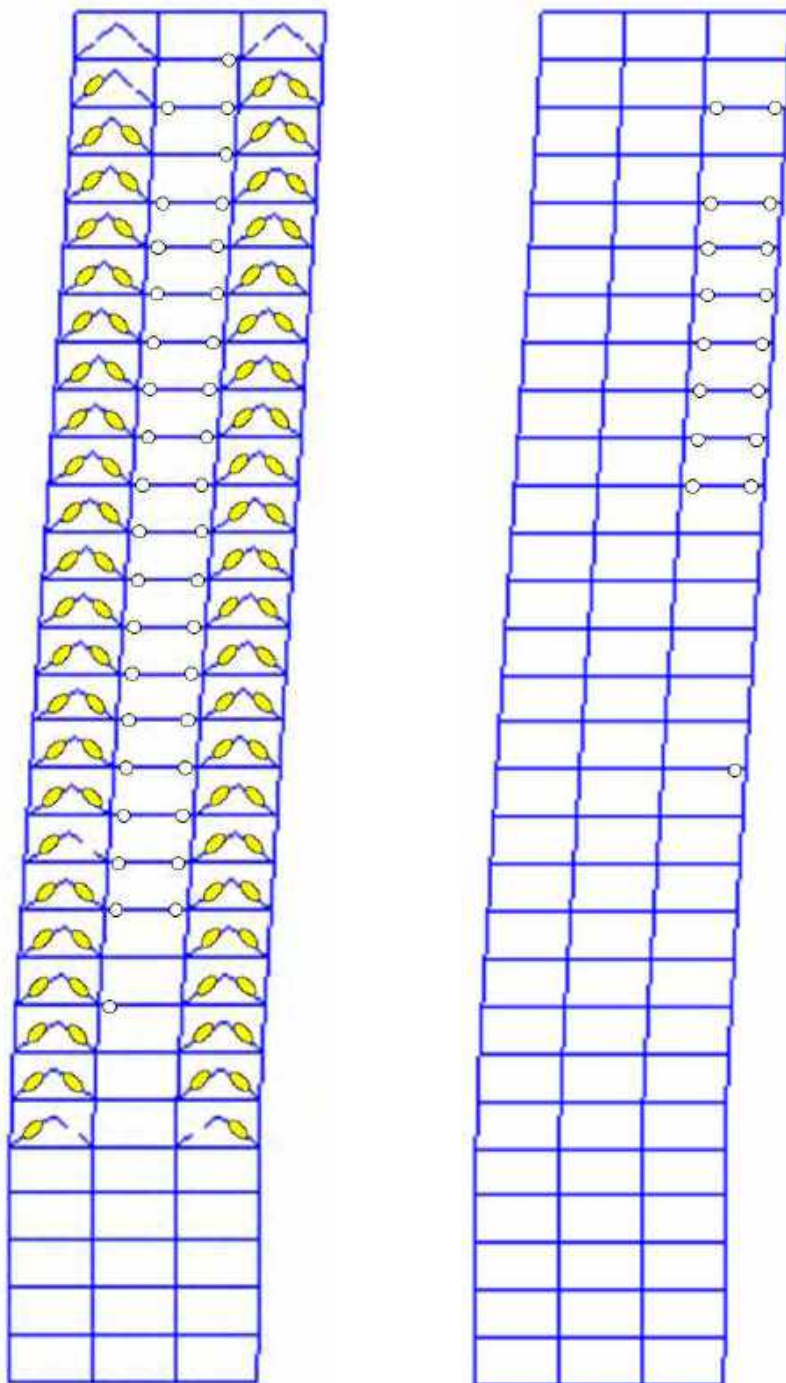
Figura H.218. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración SCT185-B (1985)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

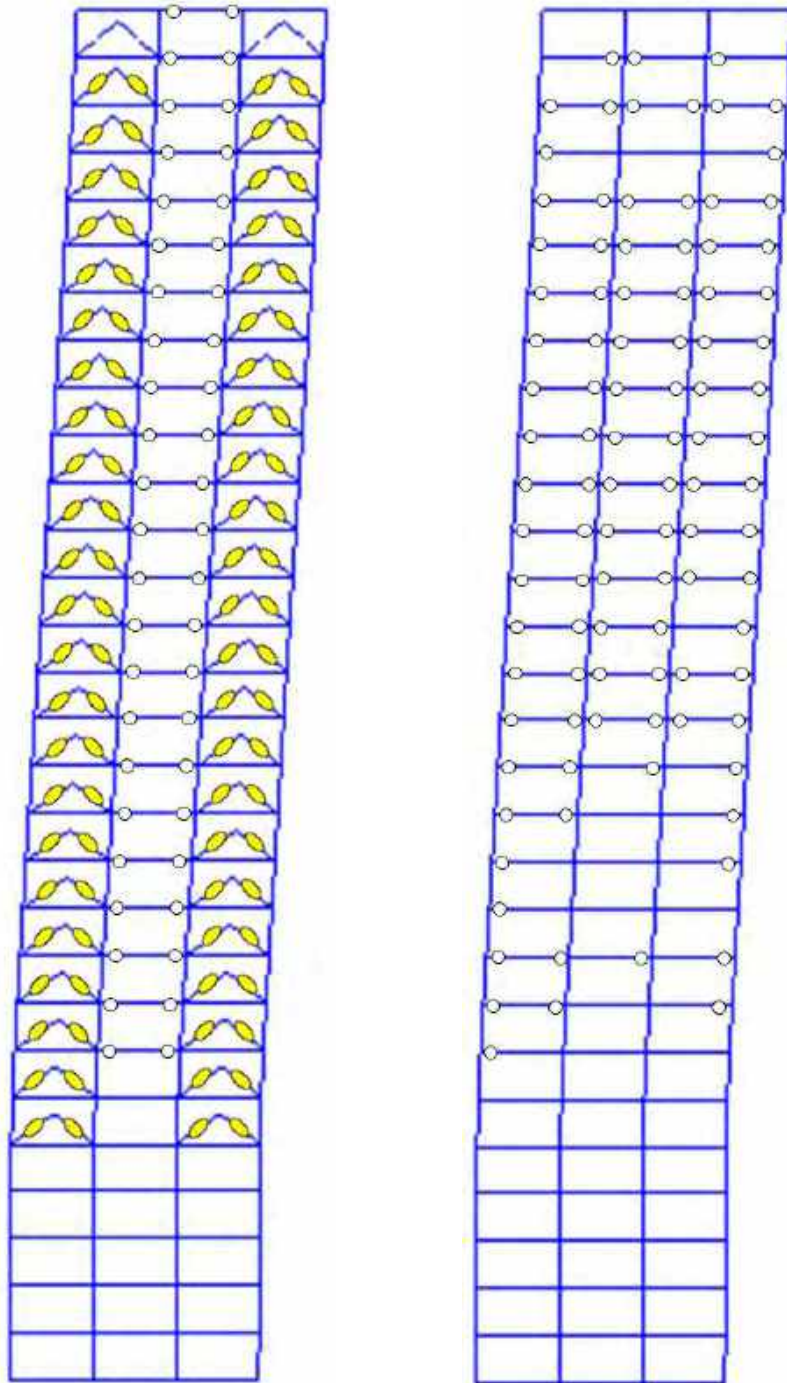
Figura H.219. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CH84-A (2017)



a) Marco perimetral

b) Marco interior

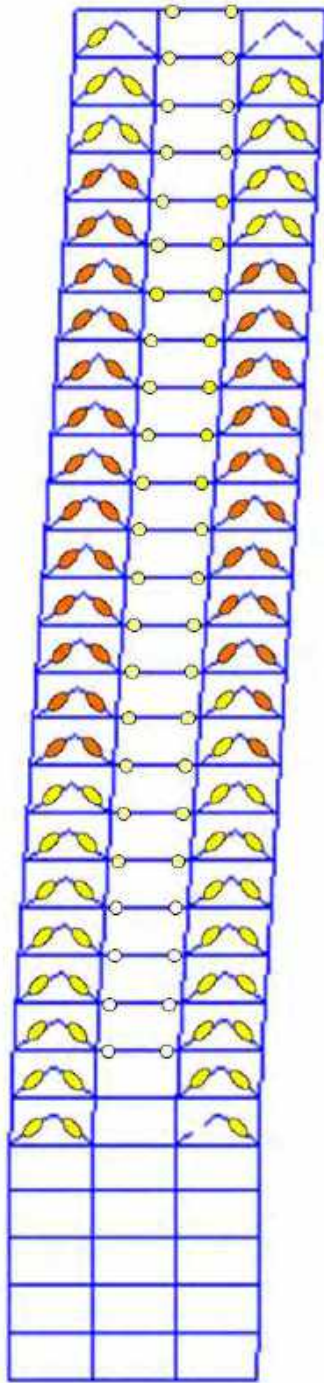
Figura H.220. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración CH84-B (2017)



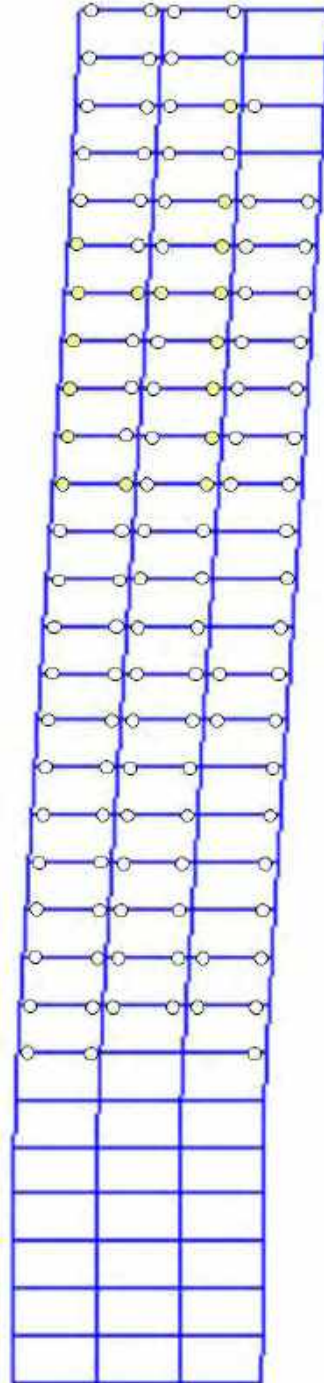
a) Marco perimetral

b) Marco interior

Figura H.221. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-A (2017)

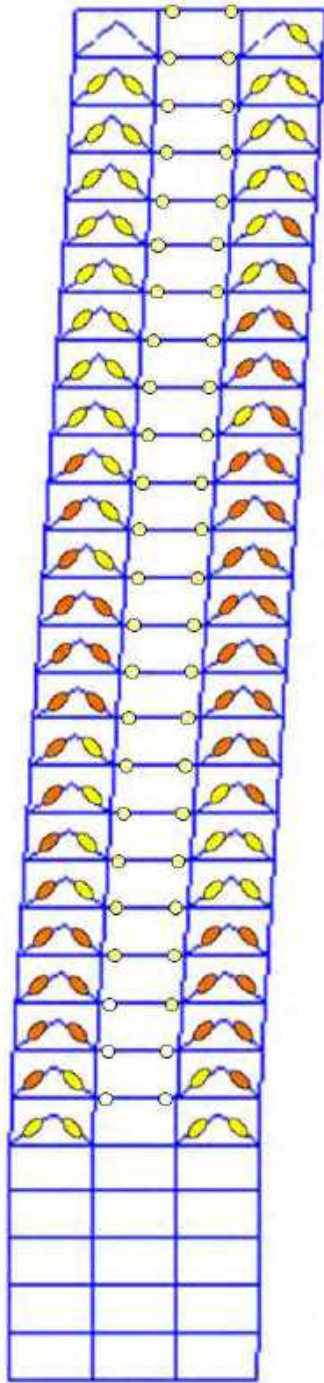


a) Marco perimetral

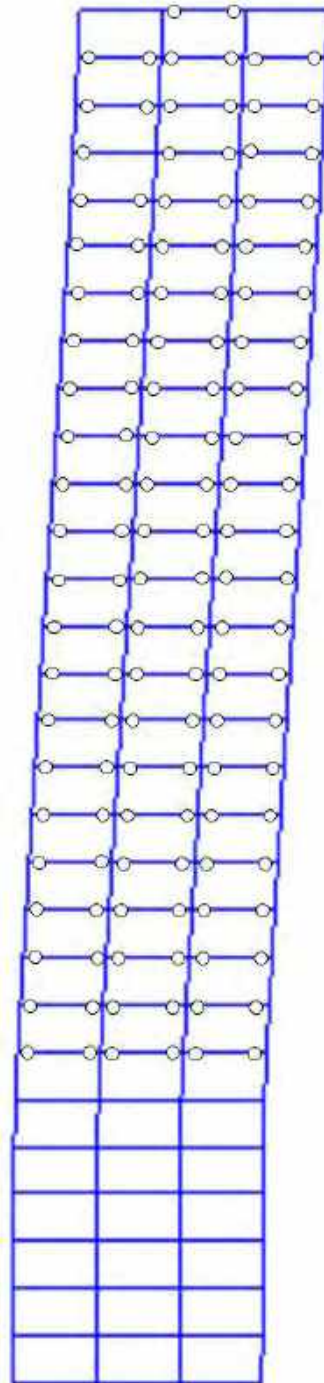


b) Marco interior

Figura H.222. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración MI15-B (2017)

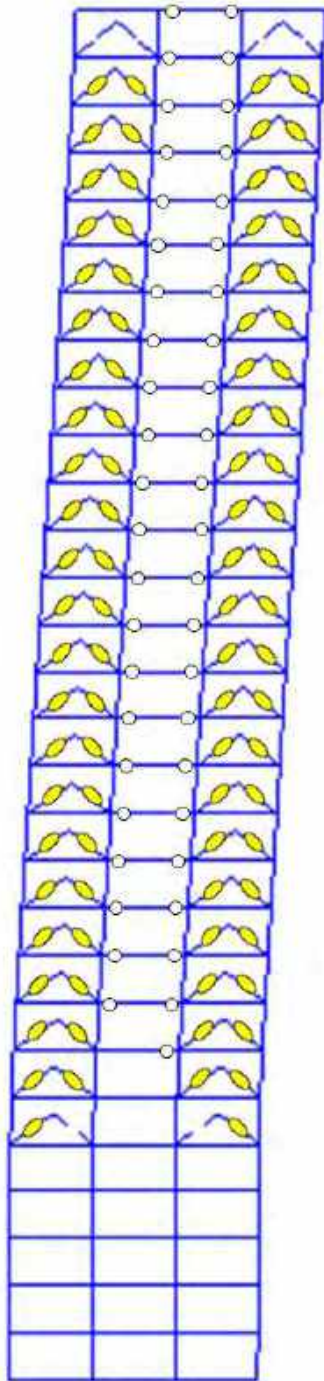


a) Marco perimetral

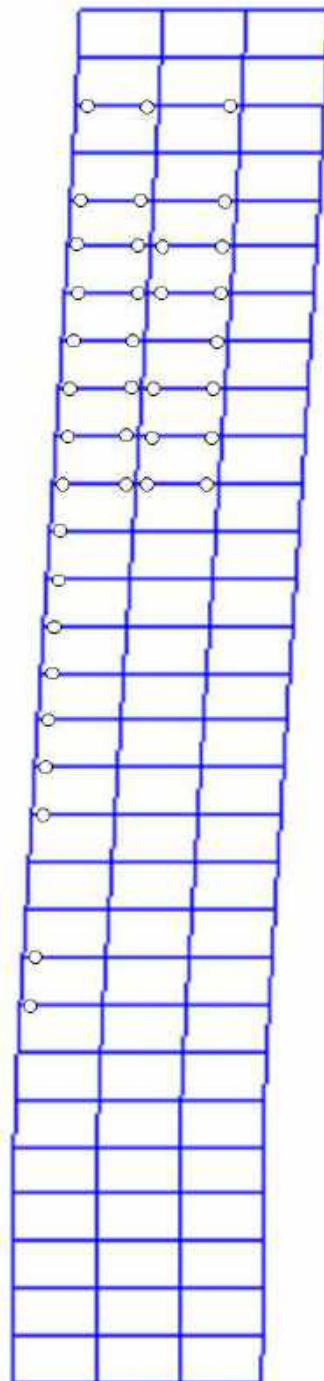


b) Marco interior

Figura H.223. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración XO36-A (2017)



a) Marco perimetral



b) Marco interior

Figura H.224. Mapeos de fluencias inelásticas, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.2.7 Respuesta Global

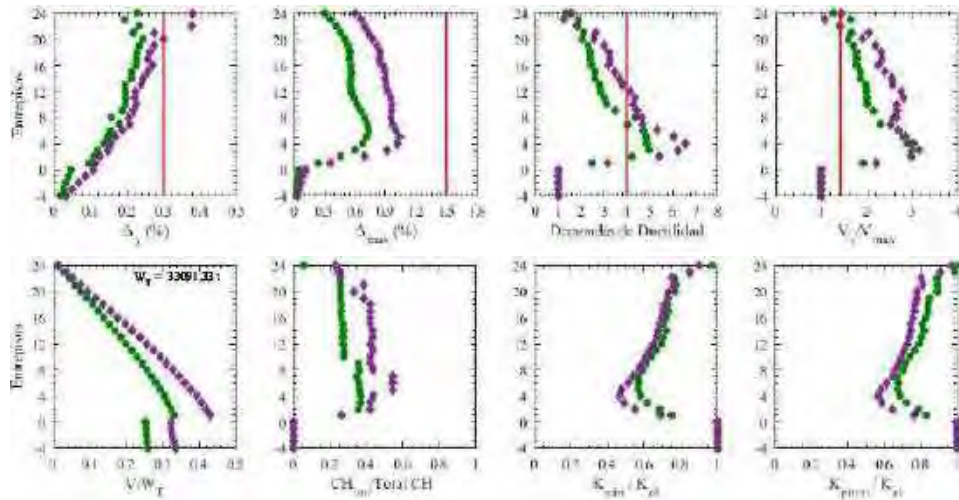


Figura H.225. Resumen de respuesta global, registros de aceleración TL08-A

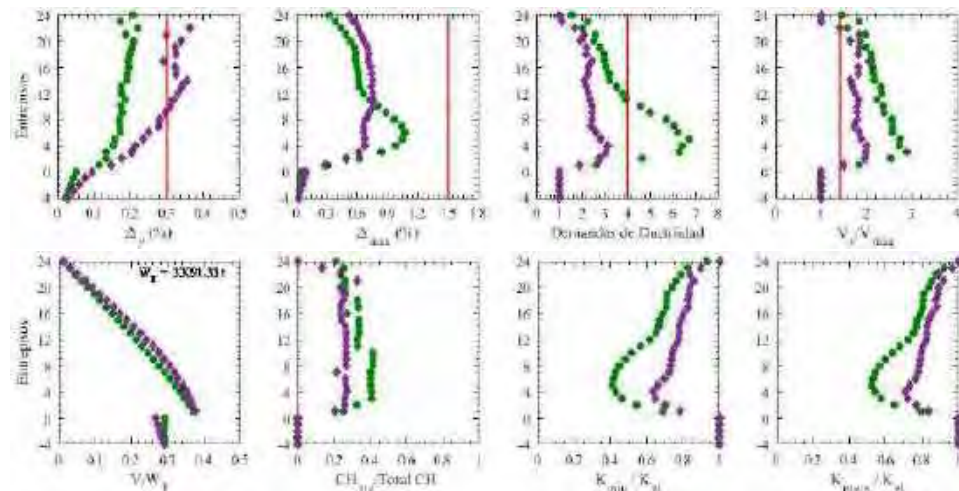


Figura H.226. Resumen de respuesta global, registros de aceleración TL08-B

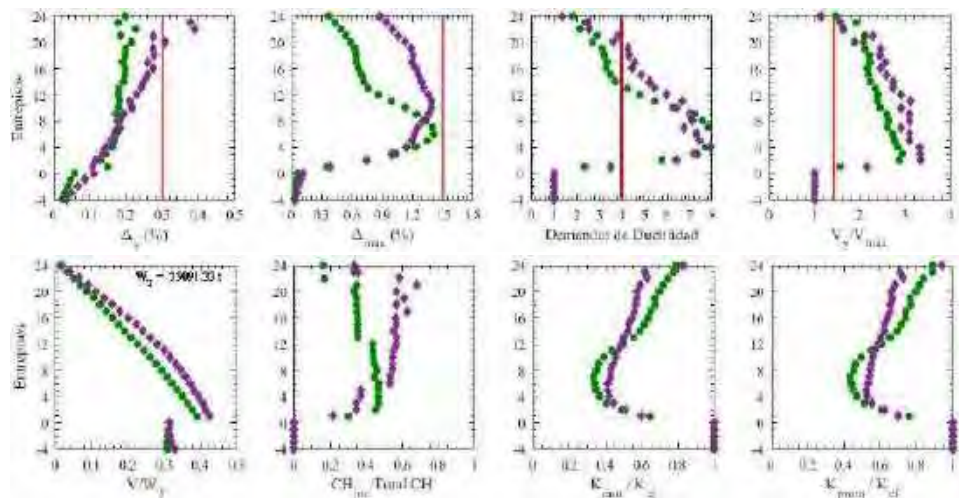


Figura H.227. Resumen de respuesta global, registros de aceleración CJ03-A

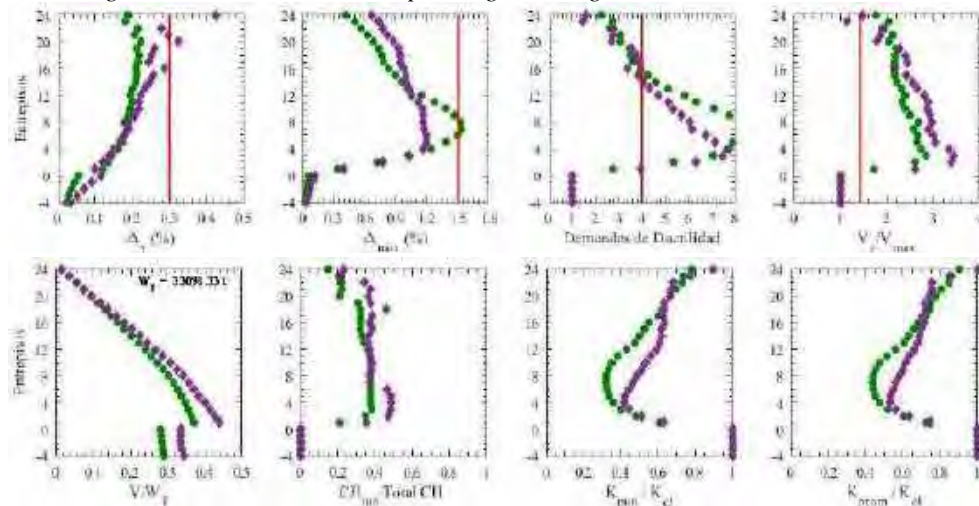


Figura H.228. Resumen de respuesta global, registros de aceleración CJ03-B

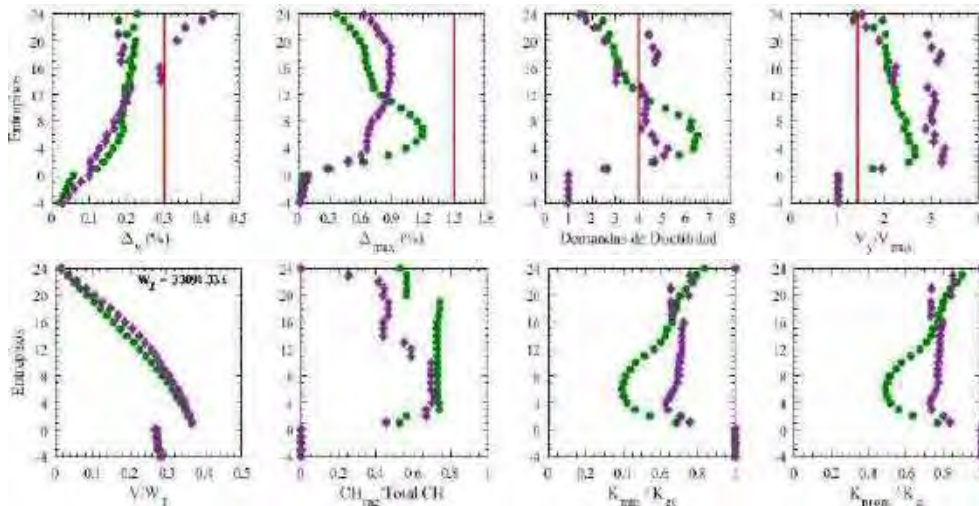


Figura H.229. Resumen de respuesta global, registros de aceleración ALAM85-A

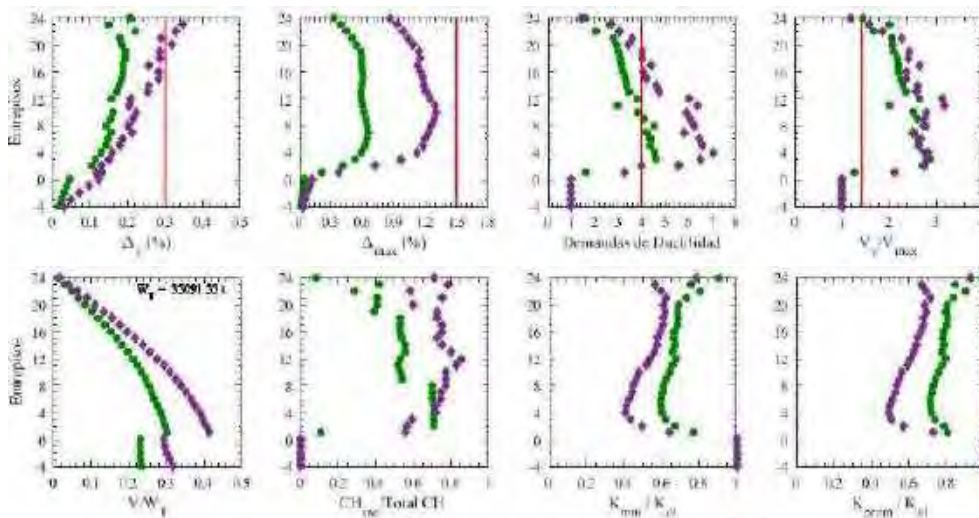


Figura H.230. Resumen de respuesta global, registros de aceleración ALAM85-B

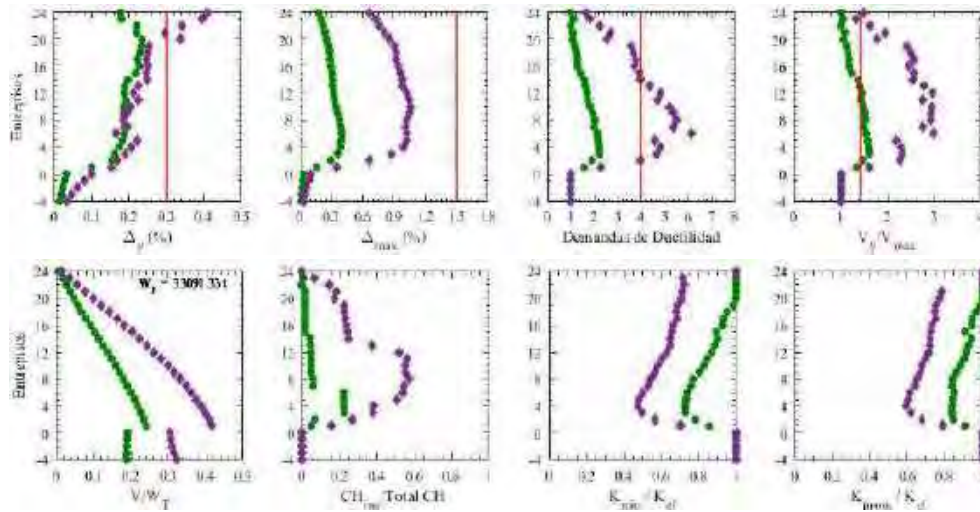


Figura H.231. Resumen de respuesta global, registros de aceleración TBOM-A (1985)

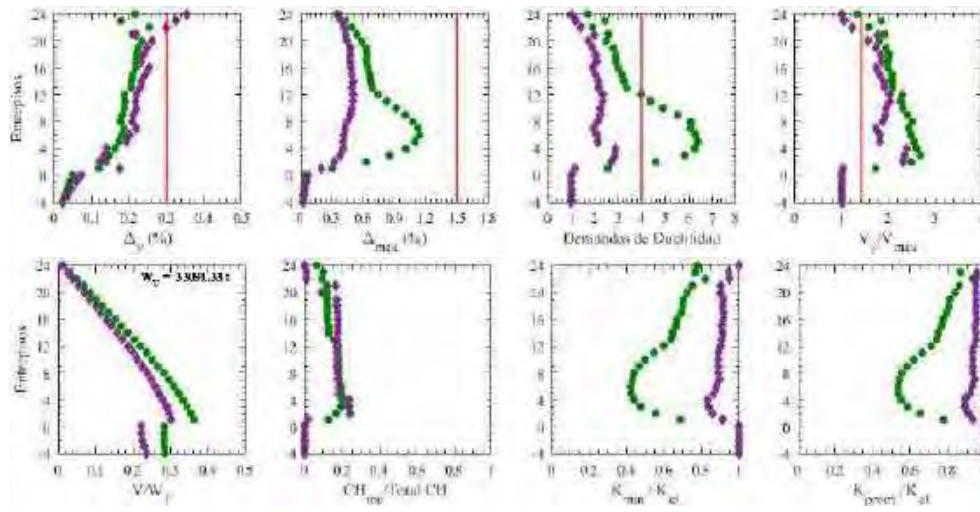


Figura H.232. Resumen de respuesta global, registros de aceleración TBOM-B (1985)

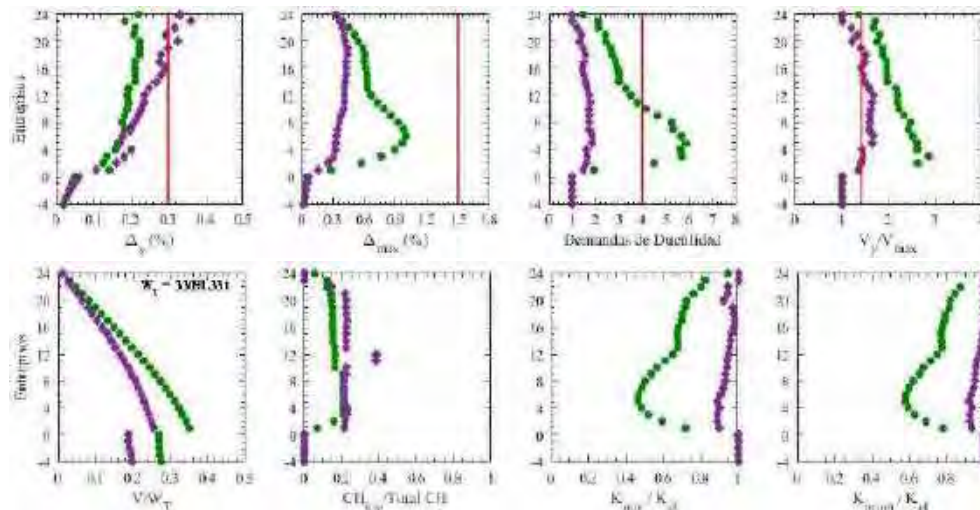


Figura H.233. Resumen de respuesta global, registros de aceleración SCT185-A (1985)

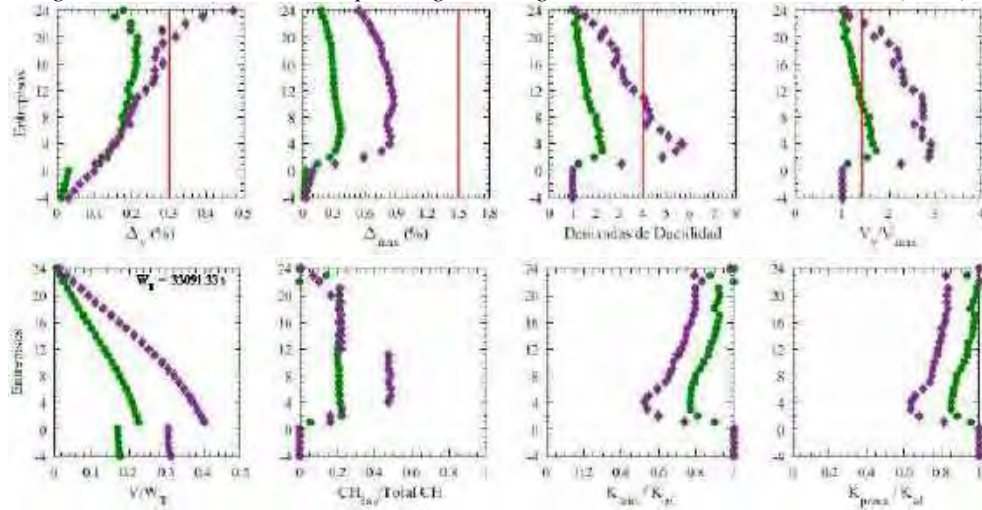


Figura H.234. Resumen de respuesta global, registros de aceleración SCT185-B (1985)

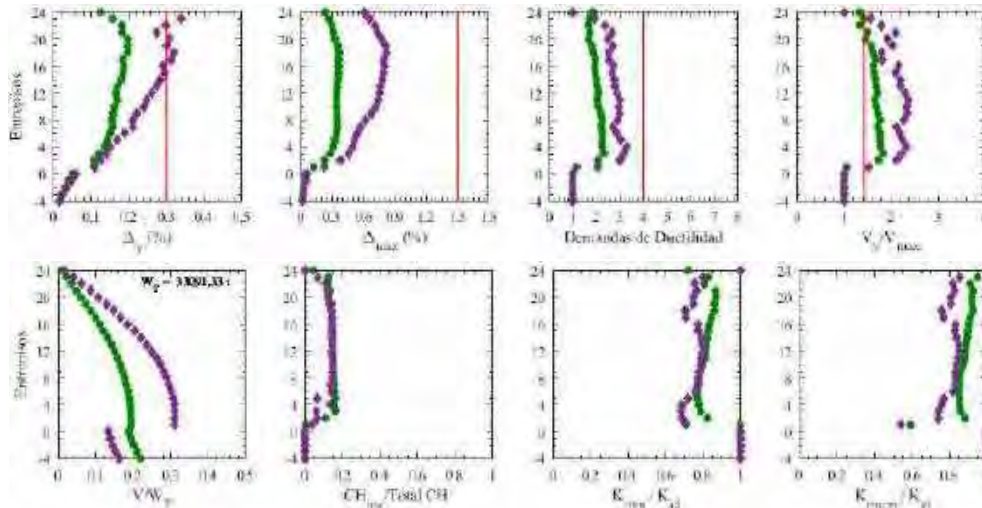


Figura H.235. Resumen de respuesta global, registros de aceleración CH84-A (2017)

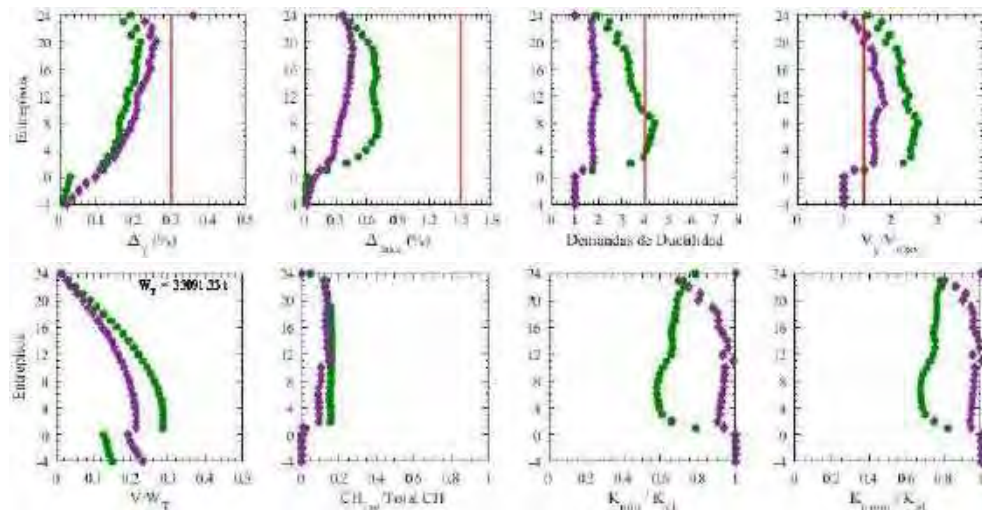


Figura H.236. Resumen de respuesta global, registros de aceleración CH84-B (2017)

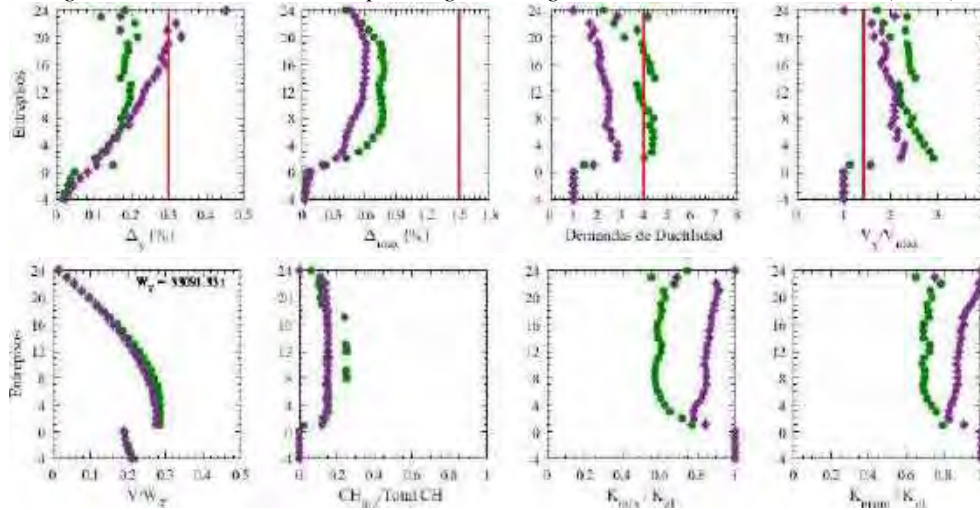


Figura H.237. Resumen de respuesta global, registros de aceleración MI15-A (2017)

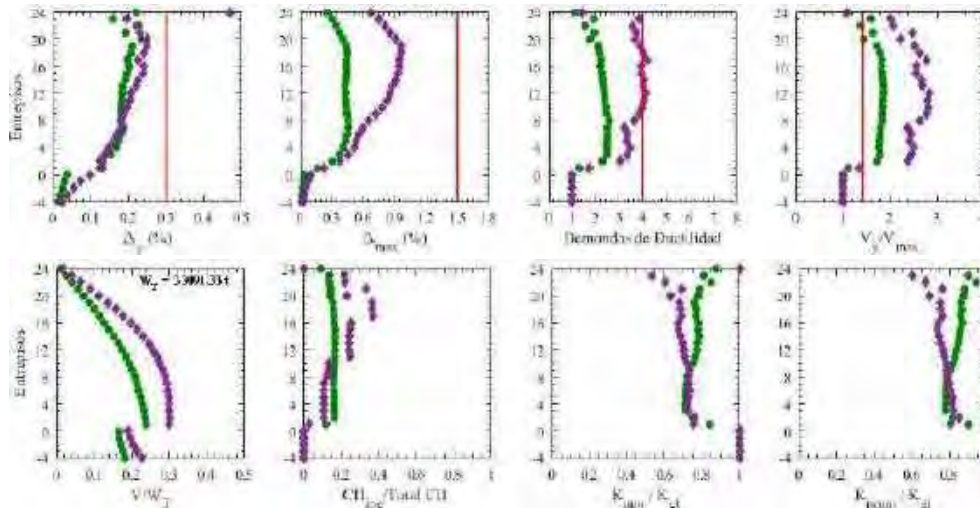


Figura H.238. Resumen de respuesta global, registros de aceleración MI15-B (2017)

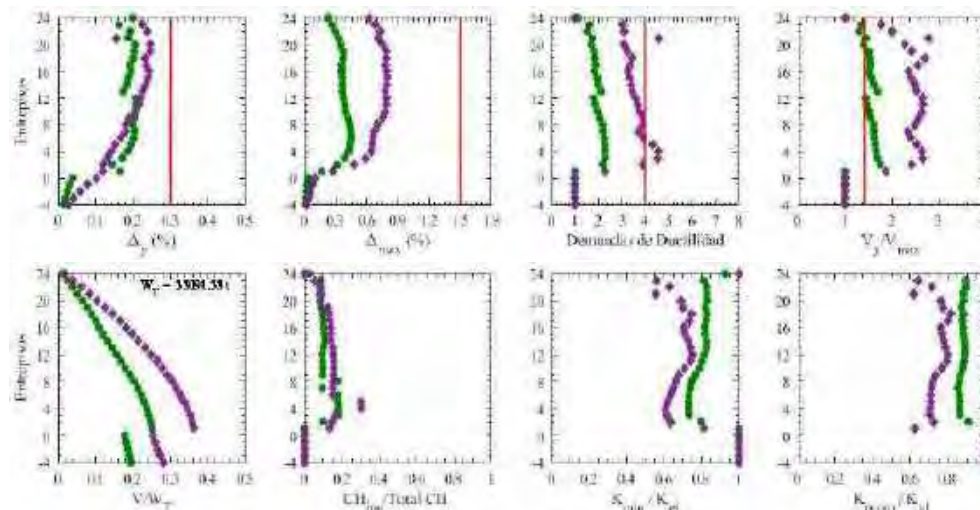


Figura H.239. Resumen de respuesta global, registros de aceleración XO36-A (2017)

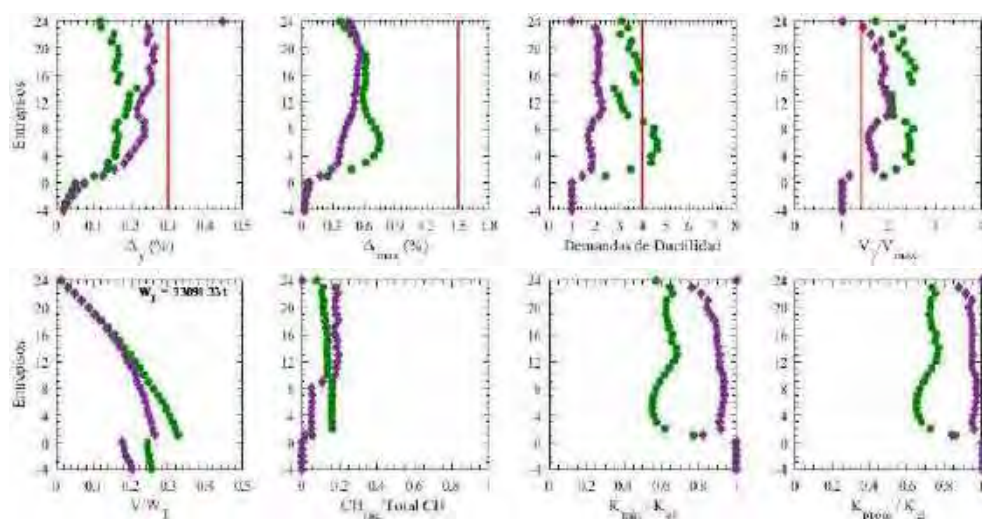


Figura H.240. Resumen de respuesta global, registros de aceleración XO36-B (2017)

H.2.8 Distorsiones Residuales

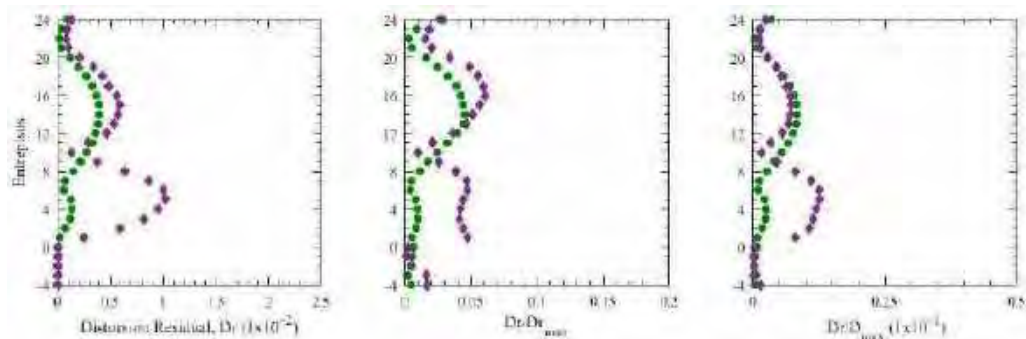


Figura H.241. Distorsiones residuales, registros de aceleración TL08-A

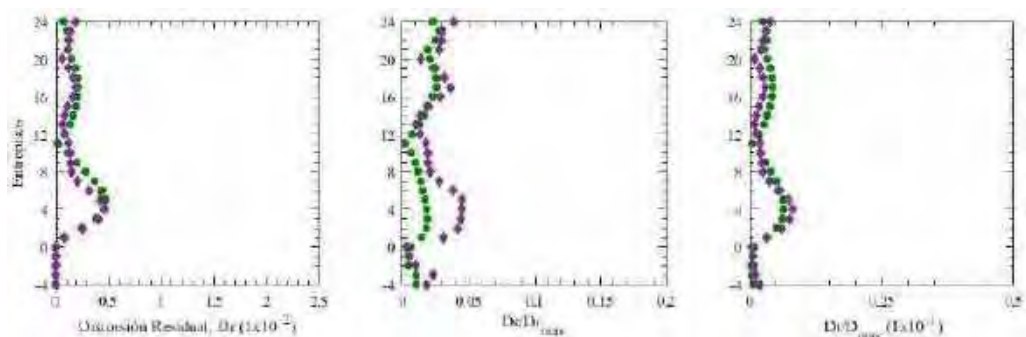


Figura H.242. Distorsiones residuales, registros de aceleración TL08-B

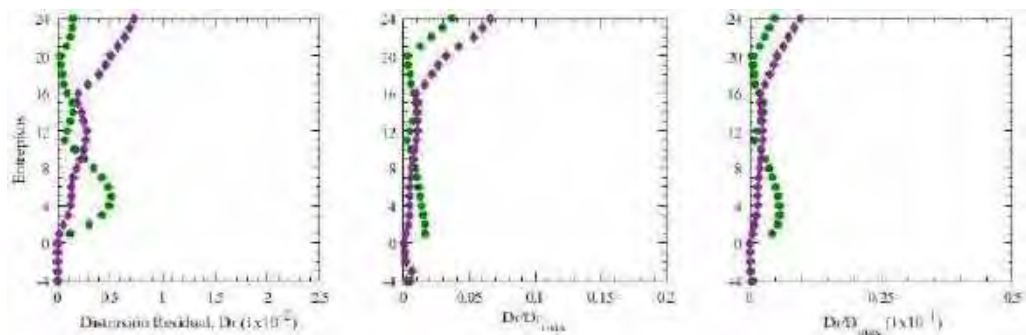


Figura H.243. Distorsiones residuales, registros de aceleración CJ03-A

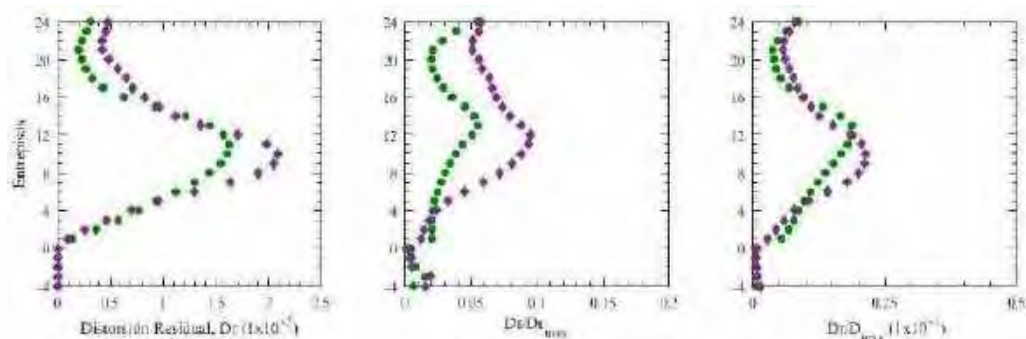


Figura H.244. Distorsiones residuales, registros de aceleración CJ03-B

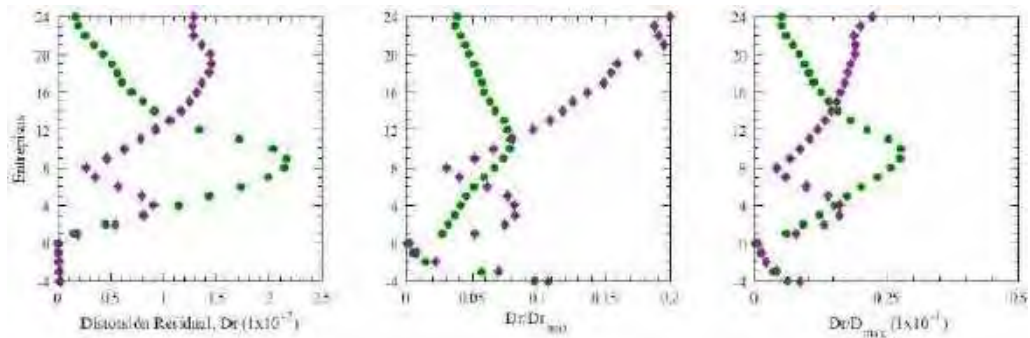


Figura H.245. Distorsiones residuales, registros de aceleración ALAM85-A

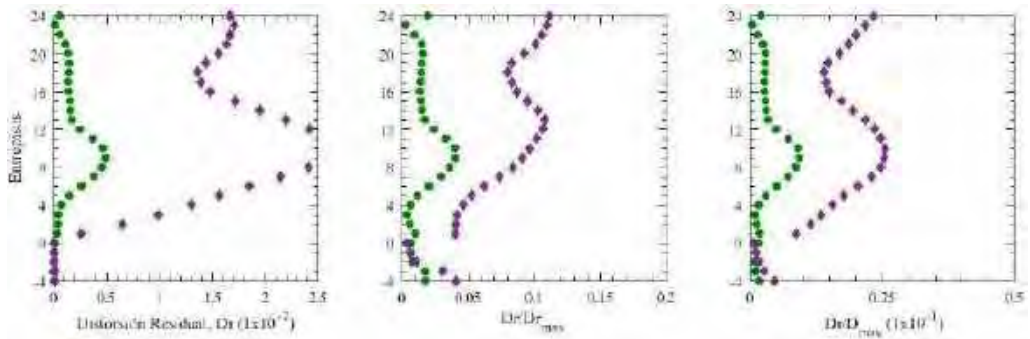


Figura H.246. Distorsiones residuales, registros de aceleración ALAM85-B

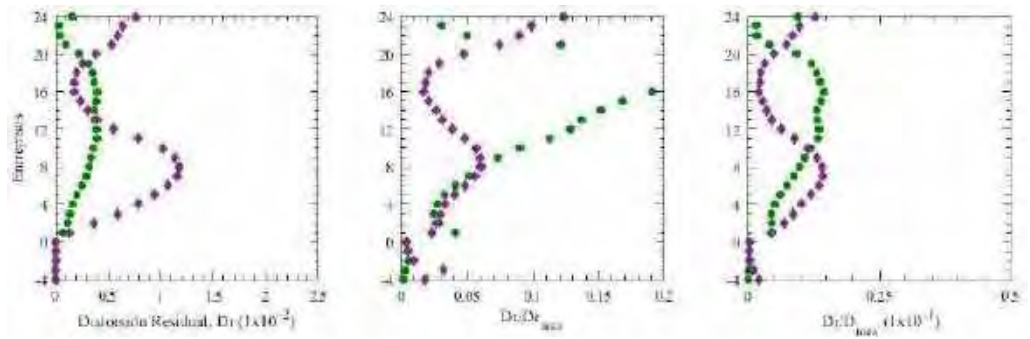


Figura H.247. Distorsiones residuales, registros de aceleración TBOM-A (1985)

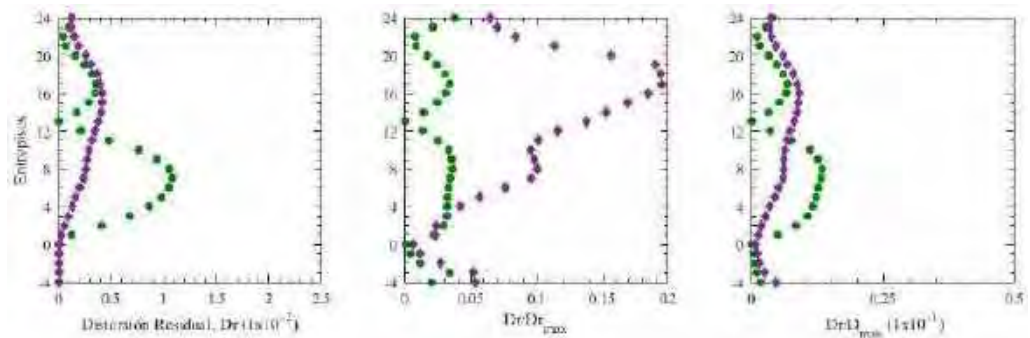


Figura H.248. Distorsiones residuales, registros de aceleración TBOM-B (1985)

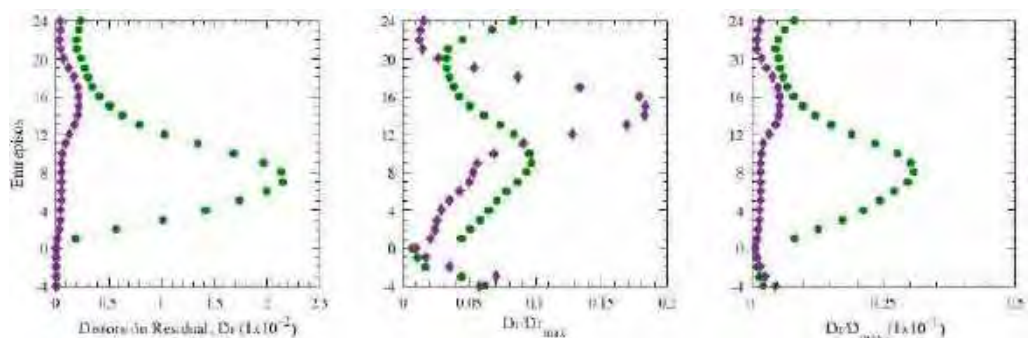


Figura H.249. Distorsiones residuales, registros de aceleración SCT185-A (1985)

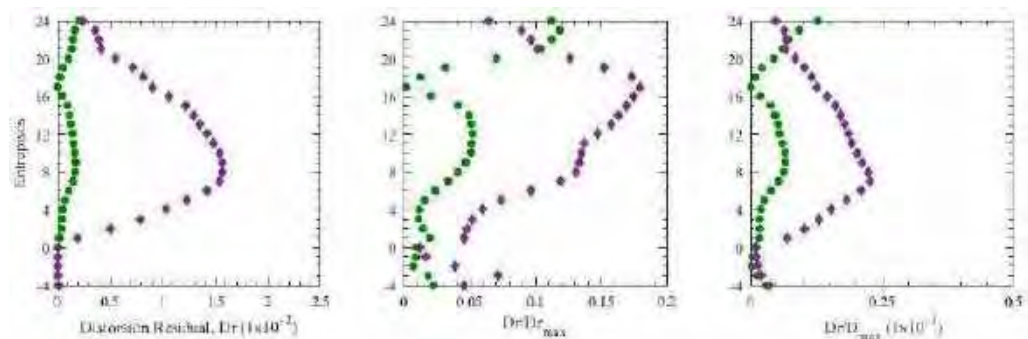


Figura H.250. Distorsiones residuales, registros de aceleración SCT185-B (1985)

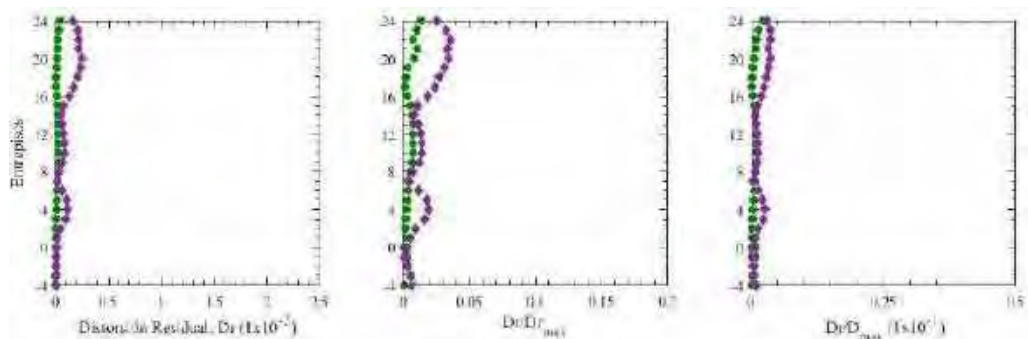


Figura H.251. Distorsiones residuales, registros de aceleración CH84-A (2017)

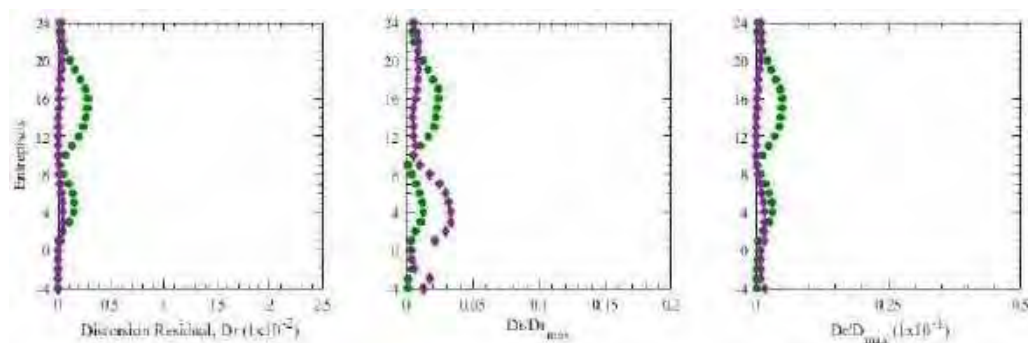


Figura H.252. Distorsiones residuales, registros de aceleración CH84-B (2017)

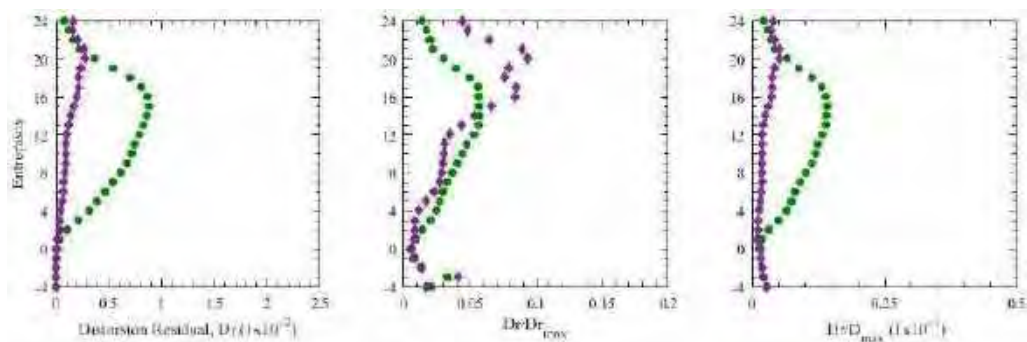


Figura H.253. Distorsiones residuales, registros de aceleración MI15-A (2017)

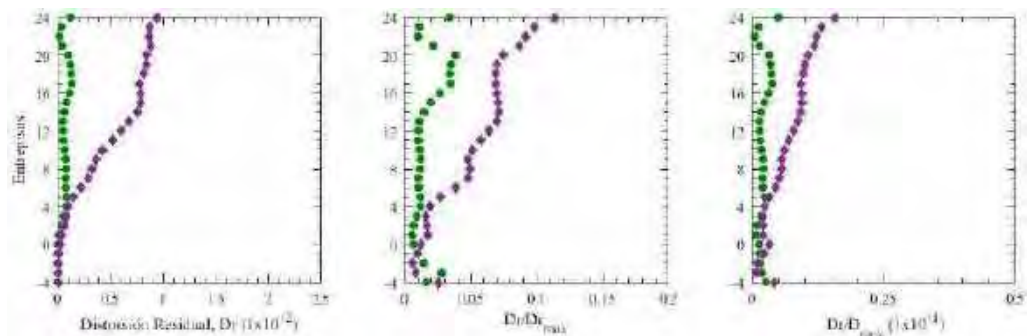


Figura H.254. Distorsiones residuales, registros de aceleración MI15-B (2017)

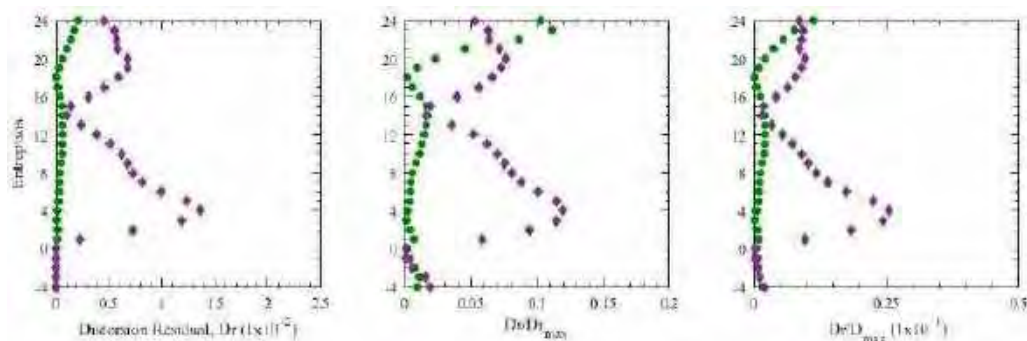


Figura H.255. Distorsiones residuales, registros de aceleración XO36-A (2017)

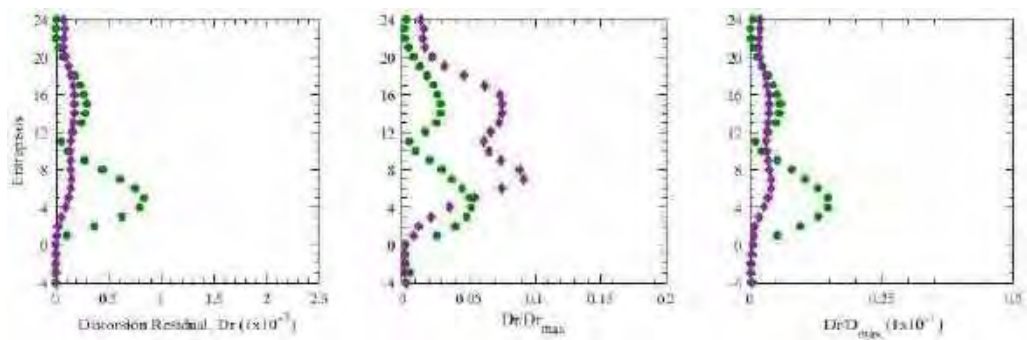


Figura H.256. Distorsiones residuales, registros de aceleración XO36-B (2017)